

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies industrials

**Disseny i optimització del xassís d'un vehicle elèctric
per ELECTROCAT 2019.**

MEMÒRIA

Autors: Jordi Cullell Massó i Sergio Rodríguez Antón
Director: Emilio Hernández Chiva
Convocatòria: Juliol 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Aquest projecte de fi de grau té com a objectiu dissenyar un xassís per un vehicle elèctric que pugui competir per l'equip CREVE en la competició Electrocat 2019, i estudiar el seu comportament en pista mitjançant simulacions de càrrega en diversos escenaris.

S'ha utilitzat el disseny del xassís del 2018 de l'equip CREVE com a model base, i s'ha seguit un procés d'optimització de la estructura existent fins obtenir uns resultats satisfactoris que milloren el xassís existent i compleixen els requeriments de la normativa de la competició.

El primer pas d'aquest projecte ha estat estudiar el comportament del xassís actual mitjançant simulacions que emulin les càrregues patides en el pas per pista per determinar les tensions i deformacions de la estructura en cada situació.

S'ha utilitzat el software de disseny i simulació CAD 3D *SolidWorks* tant per fer el model 3D com les simulacions amb el mètode dels elements finits.

Un cop analitzats els resultats, s'han fixat una sèrie de criteris de millora que han servit de pauta per implementar canvis en el xassís. S'ha decidit que el paràmetre més important a optimitzar en el nou xassís era la relació pes-rigidesa.

Seguint els criteris de millora s'ha obtingut un prototip per al model de l'any vinent, i s'han tornat a realitzar les mateixes simulacions fetes al xassís original per determinar el seu comportament sota càrrega. S'han comparat els resultats obtinguts amb els del xassís anterior i s'ha avaluat si els canvis introduïts tenen un impacte significatiu en el rendiment del vehicle, i per tant si aplicar-los suposarà una millora important respecte el xassís original.

Sumari

RESUM	3
SUMARI	5
ÍNDEX DE FIGURES	7
1. INTRODUCCIÓ	10
1.1 Objectius.....	10
2. EL XASSÍS	11
2.1 Xassís 2018.....	12
3. COMPETICIÓ ELECTROCAT	17
3.1 Què és l'Electrocat?	17
3.2 Objectius de l'Electrocat.....	17
3.3 Requeriments tècnics dels vehicles:	18
4. SIMULACIONS XASSÍS 2018	23
4.1 Mètode dels elements finits.....	23
4.2 Model.....	23
4.3 Condicions de contorn.....	24
4.4 Resultats.....	25
4.5 Metodologia de les simulacions	26
4.6 Torsió.....	28
4.7 Flexió	33
4.8 Impacte frontal.....	35
4.9 Acceleració	40
4.10 Frenada	44
4.11 Corba.....	47
4.12 Bolcada.....	52
5. OPTIMITZACIÓ	58
5.1 Criteris de disseny:	58
5.2 Variables a modificar per millorar el disseny:.....	63
5.3 Similituds entre els dos xassís.	64
6. OPTIMITZACIÓ ITERATIVA I DISSENY FINAL	65
6.1 Primera iteració: V1	65
6.2 Segona iteració: V2	67

6.3	Vuitena iteració: V8	69
6.4	Tretzena iteració: V13	71
7.	XASSÍS 2019	74
7.1	Proves de verificació	78
8.	SIMULACIONS XASSÍS 2019	82
8.1	Torsió.....	82
8.2	Flexió	84
8.3	Impacte frontal.....	87
8.4	Acceleració	89
8.5	Frenada	91
8.6	Bolcada.....	97
9.	CONCLUSIONS	103
10.	AGRAÏMENTS	105
11.	BIBLIOGRAFIA	106

Índex de figures

Figura 1. Components de l'equip CREVE i xassís i carrosseria del model 2018.....	12
Figura 2. Xassís modelat en SolidWorks	12
Figura 3. Tren de rodes posteriors	14
Figura 4. Ancoratge secundari posterior	14
Figura 5. Ancoratge amortidor rodes posteriors	14
Figura 6. Distribució de masses al xassís i punts d'ancoratge	15
Figura 7. Restriccions d'alçada, longitud i amplada pel xassís	19
Figura 8. Parts d'un xassís genèric	21
Figura 9. Ancoratge secundari posterior	24
Figura 10. Condicions de contorn i càrregues a l'estudi de torsió	29
Figura 11. Vista frontal dels desplaçaments en Y en l'assaig de torsió	31
Figura 12. Distribució de tensions en l'assaig de torsió	32
Figura 13. Desplaçaments totals en l'assaig de flexió	34
Figura 14. Distribució de tensions en l'assaig de flexió	34
Figura 15. Condicions de contorn i forces aplicades en l'assaig d'impacte frontal	37
Figura 16. Desplaçaments totals en l'assaig d'impacte frontal	38
Figura 17. Condicions de contorn i forces aplicades en l'assaig d'acceleració.....	41
Figura 18. Distribució de tensions en l'assaig d'acceleració.....	42
Figura 19. Desplaçaments totals en l'assaig d'acceleració	42
Figura 20. Condicions de contorn a l'assaig de frenada.....	44
Figura 21. Forces aplicades a l'assaig de frenada.....	46
Figura 22. Desplaçaments totals en l'assaig de frenada	46
Figura 23. Distribució de tensions en l'assaig de frenada	47
Figura 24. Condicions de contorn en l'assaig de pas per corba.....	48
Figura 25. Forces aplicades a l'assaig de corba simulant un gir a l'esquerra.....	49
Figura 26. Desplaçaments totals en l'assaig de corba simulant un gir a l'esquerra	50
Figura 27. Desplaçaments en Y en l'assaig de corba simulant un gir a l'esquerra.....	50
Figura 28. Distribució de tensions en l'assaig de pas per corba	51
Figura 29. Condicions de contorn i forces aplicades en l'assaig de bolcada (Direcció força x negatiu)	53
Figura 30. Distribució de tensions en l'assaig de bolcada - Força aplicada en Y	54
Figura 31. Desplaçaments totals en l'assaig de bolcada - Força aplicada en Y.....	54
Figura 32. Distribució de tensions en l'assaig de bolcada - Força aplicada en X negatiu	55
Figura 33. Desplaçaments totals en l'assaig de bolcada - Força aplicada en X negatiu	55

Figura 34. Distribució de tensions en l'assaig de bolcada - Força aplicada en Z	56
Figura 35. Desplaçaments totals en l'assaig de bolcada - Força aplicada en Z	56
Figura 36. Components de l'equip CREVE amb el xassís de l'any 2018.....	61
Figura 37. Part frontal xassís 2018	62
Figura 38. Part frontal xassís optimitzat	62
Figura 39. Comparació de l'abans i el després de la triangulació	63
Figura 40. Primera versió del xassís optimitzat	65
Figura 41. Distribució de tensions de la primera versió optimitzada	66
Figura 42. Segona versió del xassís optimitzat.....	67
Figura 43. Distribució de tensions de la segona versió optimitzada.....	68
Figura 44. Vuitena versió del xassís optimitzat	69
Figura 45. Distribució de tensions de la vuitena versió optimitzada.....	70
Figura 46. Tretzena versió del xassís optimitzat.....	71
Figura 47. Distribució de tensions de la tretzena versió optimitzada	71
Figura 48. Nou model de xassís després de tot el procés d'optimització	74
Figura 49. Vista lateral del nou xassís	75
Figura 50. Vista frontal del nou xassís	75
Figura 51. Vista superior del nou xassís	75
Figura 52. Distribució de masses al xassís optimitzat i els punts d'ancoratge.....	77
Figura 53. Croquis de la posició normal de conducció per un pilot d'1.70 m	79
Figura 54. Croquis de les espatlles del pilot	80
Figura 55. Desplaçaments en l'eix Y en l'assaig de torsió al xassís optimitzat.....	83
Figura 56. Distribució de tensions en l'assaig de torsió al xassís optimitzat.....	83
Figura 57. Desplaçaments totals en l'assaig a flexió al xassís optimitzat	84
Figura 58. Distribució de tensions en l'assaig a flexió al xassís optimitzat	85
Figura 59. Distribució de les forces d'impacte al llarg del frontal del xassís	87
Figura 60. Desplaçaments totals en l'assaig d'impacte frontal al xassís optimitzat	88
Figura 61. Desplaçaments totals en l'assaig d'acceleració al xassís optimitzat	89
Figura 62. Distribució de tensions en l'assaig d'acceleració al xassís optimitzat.....	90
Figura 63. Distribució de tensions a l'assaig de frenada al xassís optimitzat	92
Figura 64. Desplaçaments totals a l'assaig de frenada al xassís optimitzat	92
Figura 65. Desplaçaments totals a l'assaig de pas per corba al xassís optimitzat	94
Figura 66. Desplaçaments en l'eix Z a l'assaig de pas per corba al xassís optimitzat	95
Figura 67. Distribució de tensions a l'assaig de pas per corba al xassís optimitzat	95
Figura 68. Distribució de tensions a l'assaig de bolcada al xassís optimitzat – Força en direcció Y negativa.....	97

Figura 69. Desplaçaments totals a l'assaig de bolcada al xassís optimitzat – Força en direcció Y negativa.....	98
Figura 70. Distribució de tensions a l'assaig de bolcada al xassís optimitzat – Força en direcció X negatiu	99
Figura 71. Desplaçaments totals a l'assaig de bolcada al xassís optimitzat – Força en direcció X negatiu	99
Figura 72. Distribució de tensions a l'assaig de bolcada al xassís optimitzat – Força en direcció Z negatiu.....	100
Figura 73. Desplaçaments totals a l'assaig de bolcada al xassís optimitzat – Força en direcció Z negatiu.....	101

1. Introducció

1.1 Objectius

L'objectiu principal d'aquest treball consisteix en el disseny d'un xassís que pugui participar en la competició Electrocat 2019. El disseny d'aquest xassís es farà implementant canvis que millorin el xassís que ha emprat l'equip CREVE per la competició Electrocat 2018.

Per aconseguir aquest objectiu és necessari definir fites o objectius intermedis, que de manera última serviran per aconseguir l'objectiu principal. A continuació es presenta un llistat de les fites del treball:

- Conèixer el comportament mecànic del xassís del 2018 i identificar els seus punts forts i els seus punts febles.
- Definir una sèrie de criteris que serveixin de base per implementar millores al xassís i permetin valorar si els canvis introduïts tenen un impacte real en el rendiment del vehicle.
- Definir quins paràmetres del xassís actual es poden modificar de cara al nou disseny i quins no.
- Dissenyar un nou xassís optimitzant el model del 2018 seguint els criteris esmentats anteriorment.
- Conèixer el comportament mecànic del nou xassís i identificar-ne punts forts i febles.
- Validar que el nou disseny compleix la normativa de la competició.
- Comparar el nou disseny amb el de 2018 i valorar si els canvis introduïts justifiquen la implementació del nou disseny de cara l'any vinent.

És important clarificar que tot i que en aquest treball es presenta una estructura definitiva de xassís, aquesta és només una proposta, i no té perquè utilitzar-se l'any vinent. El CREVE és un equip amb professionals amb amplis coneixements automobilístics, mentre que aquest treball està realitzat per alumnes de grau. És en les mans de l'equip on recau la decisió final d'implementar els canvis o no

Aquesta memòria no pretén ser una pauta a seguir pas a pas per a la construcció del nou xassís, sinó que la intenció és proveir a l'equip d'una sèrie de pautes i criteris a seguir per poder implementar millores al vehicle any rere any. És per això que gran part del treball es centra en la redacció dels criteris a seguir al optimitzar la estructura, fixant així uns fonaments per al procés de millora que es puguin reutilitzar i depurar any rere any.

Tot i que al llarg d'aquesta memòria s'explicaran alguns conceptes relacionats amb el món de l'automobilisme i l'anàlisi de sòlids pel mètode dels elements finits, s'assumirà que els lectors tenen uns coneixements mínims sobre enginyeria i sobre teoria de sòlids deformables.

2. El xassís

El xassís és la estructura del vehicle que té la funció de connectar els diferents components d'aquest, suportar les masses i esforços que hi actuen i protegir al pilot de possibles impactes.

Un xassís d'un vehicle de competició és una de les parts que més defineix el comportament del vehicle en pista. Si es volen obtenir uns bons resultats en pista és necessari realitzar prèviament un estudi en profunditat de tot el vehicle, començant per el xassís.

El disseny de xassís que es realitzi impactarà de manera significativa a molts dels paràmetres que caracteritzen un vehicle, com ara:

- **Pes:** Freqüentment el xassís representa un percentatge important del pes total del vehicle. Un xassís més lleuger es tradueix en un vehicle més ràpid en pista, ja que es requereix menys energia per moure'l.
- **Rigidesa:** Un dels factors més importants en un vehicle és la seva rigidesa, i el component del vehicle que més rigidesa li aporta és el xassís. Un vehicle més rígid patirà menys deformacions degut a les càrregues que actuen en el pas per pista, i en conseqüència tindrà un millor comportament dinàmic i un menor risc de fallida del material.
- **Seguretat:** En moltes ocasions, el xassís representa la única barrera real entre el pilot i l'exterior del vehicle. Això és encara més cert en competicions on el cost i la lleugeresa dels components són una prioritat, i s'acaba donant poca importància al benestar del pilot per optimitzar al màxim el preu i el rendiment del vehicle. Un bon xassís ha de ser capaç d'absorbir els possibles impactes que es puguin rebre al competir sense danyar al pilot.
- **Preu:** Generalment una bona part del pressupost dels equips va destinada a la fabricació del xassís. El cost total d'aquest dependrà del material i del mètode de soldadura emprat. En competicions de caire més amateur, com és l'Electrocat, els equips solen disposar d'un pressupost molt limitat, i certes tecnologies i materials emprats en vehicles d'alta gama queden descartades degut al seu elevat cost.

Com ja s'ha explicat, l'objectiu final d'aquest treball és dissenyar un xassís que pugui competir en la competició Electrocat del 2019, prenent com a model base el disseny de l'any actual i optimitzant-lo fins a obtenir un disseny satisfactori.

Tots els paràmetres esmentats anteriorment s'utilitzaran per definir una sèrie de criteris que serveixin de pautes per al procés de millora i optimització.

2.1 Xassís 2018

Les mesures del xassís de l'any 2018 han estat facilitades per l'equip CREVE i modelades en un programa de disseny 3D per poder realitzar estudis més endavant. Es tracta d'un disseny de xassís tubular creat a partir de barres d'alumini de perfil circular buides per dins soldades entre elles. La gran majoria del xassís està construït amb barres de perfil 30x2mm (30mm de diàmetre exterior i 2 mm de grossor), a excepció de les barres que serveixen d'ancoratge per les rodes davanteres, que són de perfil 25x2mm. A la figura 1 es pot apreciar el xassís real, i a la figura 2 el xassís en el programa de disseny 3D.



Figura 1. Components de l'equip CREVE i xassís i carrosseria del model 2018

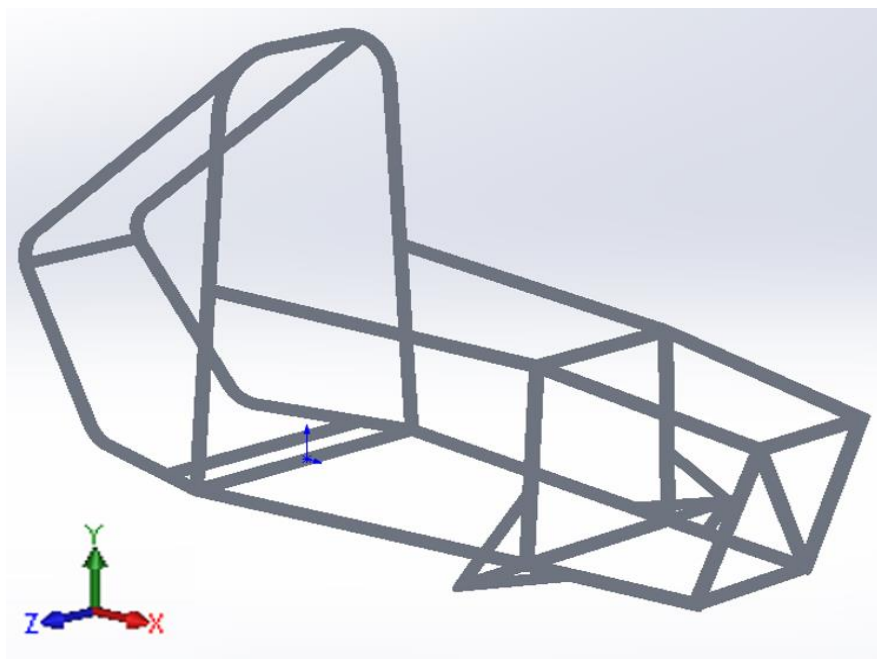


Figura 2. Xassís modelat en SolidWorks

1.1.1 Eixos de coordenades

Abans de realitzar cap estudi, cal definir clarament els eixos de coordenades del sòlid.

Tal i com es pot observar en la figura 2, s'han definit els eixos de la següent manera: l'eix Y és el vertical, l'eix Z és el perpendicular al pla de simetria del xassís i l'eix X és perpendicular als altres dos, amb direcció positiva cap el frontal del xassís. D'ara en endavant, sempre que es parli d'eixos de coordenades s'estarà parlant dels eixos del sòlid global, que són els que s'acaben de definir.

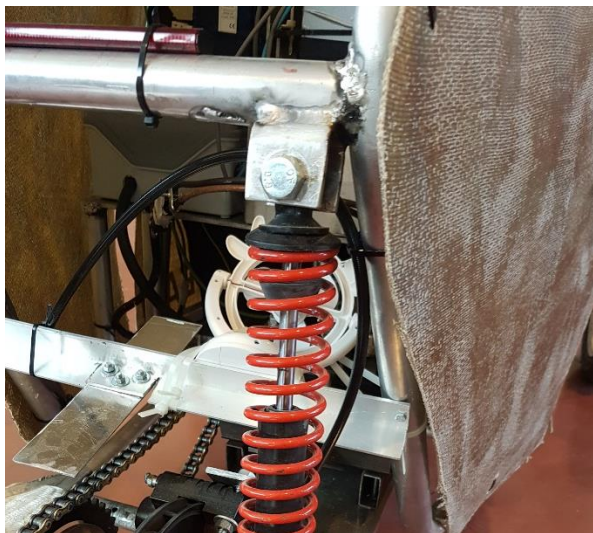
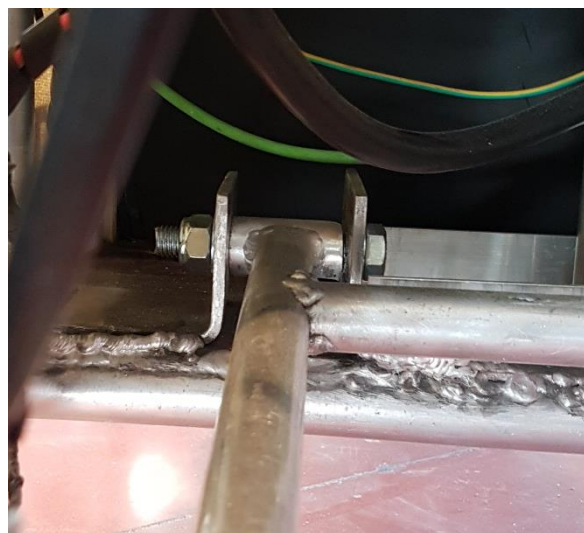
1.1.2 Model

Un cop definits els eixos, es procedirà a descriure les diferents parts del xassís. Es comentaran les particularitats del disseny i s'explicaran les simplificacions que s'han fet en el modelatge 3D per computador.

El component més peculiar del vehicle és sens dubte el tren de rodes posteriors. Aquesta part del vehicle (que inclou l'eix amb les dues rodes posteriors, els amortidors posteriors i part del sistema de transmissió) està connectada per quatre punts al xassís. D'ara en endavant s'anomenaran aquests punts com “ancoratges dels amortidors posteriors” i “ancoratges secundaris posteriors”. A la figura 3, 5 i 6 es pot observar clarament la posició d'aquests punts en el xassís.

Els ancoratges dels amortidors posteriors permeten rotació al voltant de l'eix X (figura 4), mentre que els ancoratges secundaris posteriors permeten una rotació al voltant de l'eix Z (figura 3). Degut a aquesta existència de graus de llibertat en les connexions, el vehicle no es pot estudiar com un mateix sòlid. A les simulacions es simplificaran aquestes connexions considerant que els ancoratges dels amortidors posteriors suporten càrregues en direcció vertical (eix Y), mentre que els ancoratges secundaris posteriors transmeten càrregues horitzontals (eix X).

Ja que els amortidors tenen una rotació permesa en l'eix X i són pràcticament paral·lels a l'arc de seguretat, que és vertical, es considera que aquests no transmeten parells al xassís, i que per tant els parells generats per la distància que hi ha entre la força de reacció de les rodes i el propi xassís són absorbits per la estructura del tren posterior i no el xassís.

*Figura 3. Tren de rodes posteriors**Figura 5. Ancoratge amortidor rodes posteriors**Figura 4. Ancoratge secundari posterior*

Per realitzar futures simulacions, s'ha simplificat el model considerant que totes les masses externes que hi actuen es concentren en dos punts: el seient del pilot i la safata de components. El propi pes del xassís el té en compte el programa en activar la gravetat en les simulacions, així que les masses que s'hauran d'assimilar en aquests punts són: el pilot, els components (bateria, motor, variador...), la carrosseria, el sistema de direcció i el sistema de transmissió.

En els estudis estàtics només s'estudiaran pesos flotants, és a dir, les parts que no estan directament en contacte amb el terra. Per tant no s'han tingut en compte les masses del tren posterior i les rodes davanteres al realitzar les simulacions, doncs el propi pes d'aquestes queda suportat per la seva pròpia estructura. Tot que no es tingui en compte el seu pes, aquestes parts segueixen tenint la capacitat de transmetre parell al xassís. Com ja s'ha comentat anteriorment, el tren posterior no transmet parell al xassís, però les rodes davanteres, al no tenir amortidors, sí que en transmeten al seu punt d'ancoratge. A l'apartat de simulacions s'explicaran amb més detall les característiques d'aquests parells.

A continuació s'analitzaran les masses aproximades dels components del vehicle i s'assimilarn a un dels dos punts comentats anteriorment, ja sigui al seient del pilot o la safata dels components. Posteriorment s'estudiarà com aplicar aquestes condicions al xassís en les simulacions.

Pes aplicat al seient del pilot: 75kg = [pes del pilot = 60kg + seient, sistema de direcció, carrosseria, altres components = 15kg]

Pes aplicat a la safata elèctrica de components: 40 kg = pes del motor + bateria + sistema elèctric + altres components

Pes del xassís: 8,17 kg

Pes total aproximat: 123.17kg

A la figura següent (figura 6) s'observa la distribució de masses en el xassís que s'ha utilitzat en les simulacions, els punts d'ancoratge amb les rodes davanteres i el tren de rodes posterior i nomenclatura general de la estructura que s'utilitzarà en el treball.

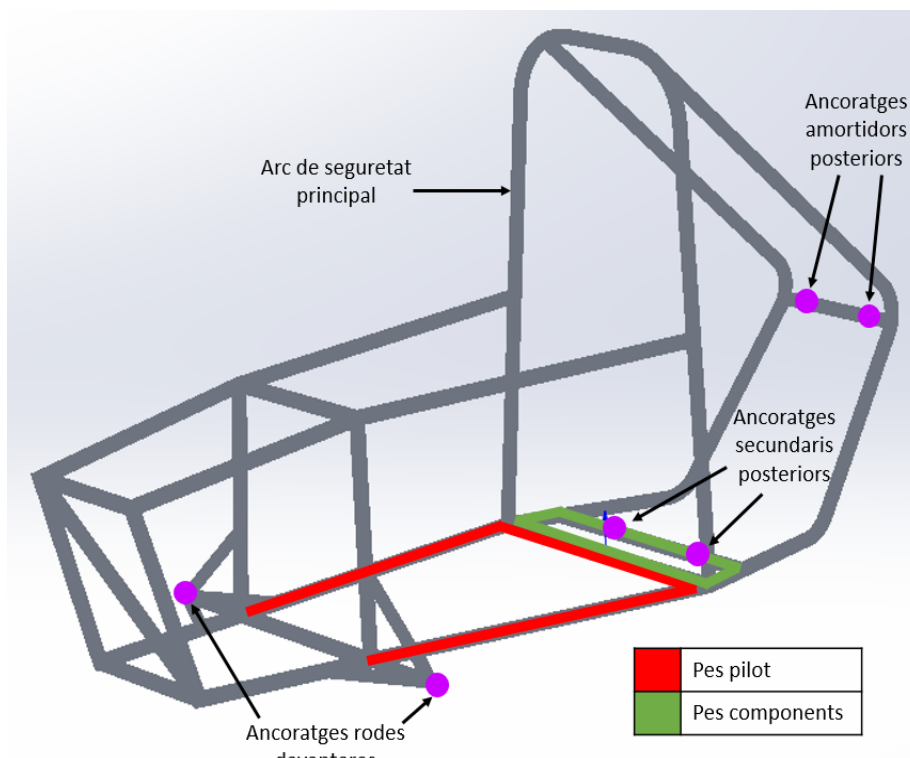


Figura 6. Distribució de masses al xassís i punts d'ancoratge

Al simular, es repartirà la massa corresponent a cada apartat entre les barres marcades a la figura.

3. Competició Electrocat

3.1 Què és l'Electrocat?

Electrocat és un certamen organitzat per l'ajuntament de Santa Perpètua de Mogoda on alumnes de Cicle Superior d'Automoció adscrits a vuit centres educatius de Catalunya dissenyen i construeixen vehicles elèctrics sobre una base motriu comuna (motor, variador i bateries) amb l'objecte de participar en una sèrie de proves en les que s'avaluaran les prestacions, característiques i disseny dels vehicles.

Per avaluar els prototips de vehicles construïts, el mes de juny es realitzen en el circuit urbà de Santa Perpètua de la Mogoda, dos tipus de proves:

- Estàtiques: presentació del projecte i verificacions tècniques
- Dinàmiques: realització de 20 voltes al circuit amb una parada per fer un canvi de bateries

Posteriorment, la organització avalua i premia els vehicles en tres categories diferents:

- Millor temps en realitzar les proves dinàmiques en circuit urbà
- Millor disseny en ergonomia - estètica
- Millor projecte

3.2 Objectius de l'Electrocat

- Potenciar el treball en equip
- Fomentar l'activitat experimental, tecnològica i creativa com a element pedagògic per al coneixement tècnic dels vehicles elèctrics
- Incorporar en el currículum de la formació professional continguts tècnics dels vehicles de tracció elèctrica
- Impulsar la capacitació i la promoció de perfils tècnics especialitzats en vehicles de tracció elèctrica que donin cobertura a les necessitats sorgides d'un nou model de mobilitat basat en els vehicles de tracció elèctrica.
- Donar un impuls real a la mobilitat sostenible i al seu desenvolupament.

3.3 Requeriments tècnics dels vehicles:

Per poder competir en el Electrocat, els vehicles han de complir una sèrie de requeriments tècnics que estan recopilats en el reglament de la competició. A continuació es presenta un resum dels requeriments que més condicionaran el disseny del xassís. El llistat complet de requeriments es pot consultar al reglament tècnic referenciat a la bibliografia d'aquest treball.

Generals:

- Els vehicles han de ser monoplaques
- Els vehicles han de tenir 4 rodes amb contacte amb el terra
- Les dues rodes davanteres exerciran el control de direcció, i les dues posteriors transmetran la tracció al terra.
- Els vehicles han d'utilitzar el material motriu cedit per la organització (motor, variador i bateria). En cap cas es podran afegir, modificar o utilitzar components diferents als subministrats per a la base motriu.
- La base motriu s'haurà de muntar sobre un xassís dissenyat i construït íntegrament per l'equip participant. En cap cas es podran utilitzar xassís comercials.

Dimensions del vehicle:

1. El vehicle ha de ser prou gran com per ubicar un pilot de mínim 1,7m. d'alçada.
2. La longitud mesurada dels extrems del xassís o la carrosseria ha de estar entre 1200 i 2400 mm.
3. L'amplada mesurada dels extrems del xassís o la carrosseria (incloent les rodes) ha de estar entre 800 i 1600 mm.
4. La alçada mesurada des del terra fins al punt més alt del xassís o la carrosseria ha de estar entre 600 i 1700 mm.
5. La separació mínima entre el xassís i el terra ha de ser de 50mm.

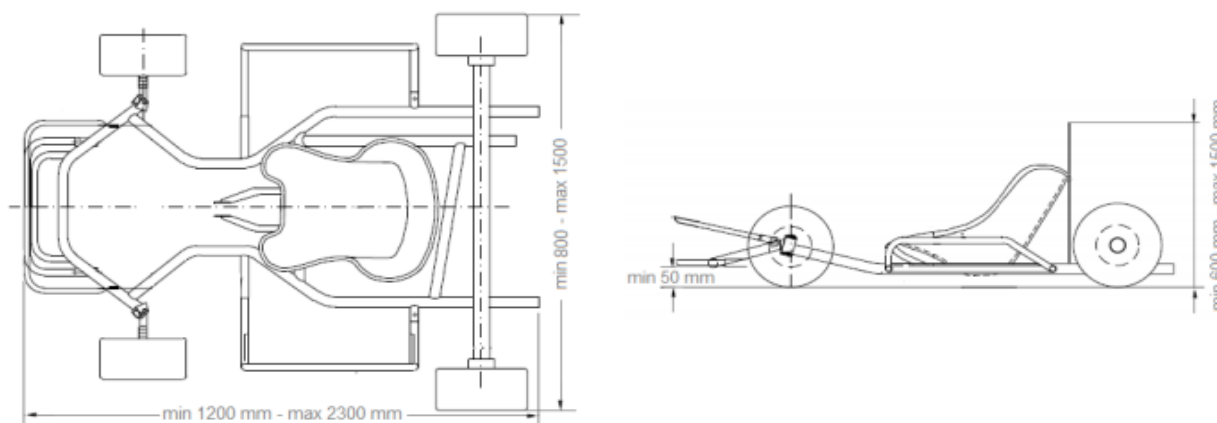


Figura 7. Restriccions d'alçada, longitud i amplada pel xassís

Carrosseria:

- El xassís ha de protegir al pilot en cas de impacte frontal o lateral
- A l'interior del vehicle no pot haver cap peça o objecte que pugui ferir al conductor en cas de col·lisió.
- No pot incloure cap apèndix extern que pugui ser perillós pel públic o assistents
- Està permès l'ús de portes d'accés per al pilot o per al manteniment del vehicle, sempre que aquestes permetin una fàcil obertura en cas d'emergència
- Tots els vehicles disposaran d'un espai de 300 mm x 220 mm en la part frontal per la ubicació del dorsal d'identificació.

Rigidesa Estructural:

- L'estructura del vehicle serà prou resistent per suportar els esforços als quals serà sotmès en el transcurs de les proves.
- El compartiment del pilot ha d'estar equipat amb un arc de seguretat que ha de ser capaç de suportar una càrrega de 700 N (70 kg), aplicada en sentit vertical, horitzontal o perpendicular, sense deformar-se.
- L'arc de seguretat abastarà l'amplada total de les espatlles dels pilots autoritzats, ha d'estar inclòs en el xassís i estendre's 50mm sobre l'extrem superior del casc del pilot en la posició normal de conducció.

Visibilitat:

- El pilot ha de tenir accés a un arc de visibilitat de 90° a cada costat de l'eix longitudinal del vehicle sense l'ajuda de cap dispositiu òptic o electrònic com miralls, prismàtics, o periscopis. El moviment del cap del pilot està permès per completar l'angle de visió.
- El vehicle ha d'estar equipat amb mínim dos miralls retrovisors, un a cada costat respectivament. Si els miralls són quadrats, les seves dimensions mínimes han de ser (101.6mm x 101.6mm), si són circulars, el diàmetre mínim permès haurà de ser de (63.5mm).
- Els miralls hauran d'estar subjectes perfectament a l'estructura per evitar que les vibracions els moguin de la seva posició original.
- Els miralls han de permetre tenir una visió posterior de 120° sense que el pilot hagi de moure en excés el cap. No hi ha d'haver estructures que interrompin la línia de visió entre els miralls i la pista ni entre els miralls i el pilot.

Ventilació:

- Per evitar el malestar del pilot i evitar sobreescalfar components com el motor o la bateria elèctrica, els vehicles han de tenir una adequada ventilació dissenyada tenint en compte les temperatures màximes que es poden assolir.

Seient del pilot:

- La posició del pilot dins del vehicle serà assegut (com en un vehicle turisme) i el respatllet del seient no presentarà una inclinació inferior als 20° de l'horitzontal.
- No pot presentar riscos pel pilot en cas d'impacte
- Ha d'incorporar un respatllet que haurà d'estar fixat a l'arc de seguretat del vehicle.
- S'ha de garantir la fermesa de la subjecció del seient al xassís

Xassís:

Es defineix com a xassís l'estructura del conjunt del vehicle que acobla les parts mecàniques i la carrosseria, compresa qualsevol peça solidària d'aquesta estructura.

Totes les parts principals del xassís han d'estar sòlidament soldades amb equips de soldadura MIG o TIG, o en la seva impossibilitat amb equips de soldadura autògena.

El xassís haurà d'estar compost per els següents elements:

- 1- Llantes amb suport
- 2- Eix posterior
- 3- Porta mangueta
- 4- Pivots
- 5- Suports d'eix posterior i davanter
- 6- Part de connexió davant-darrere

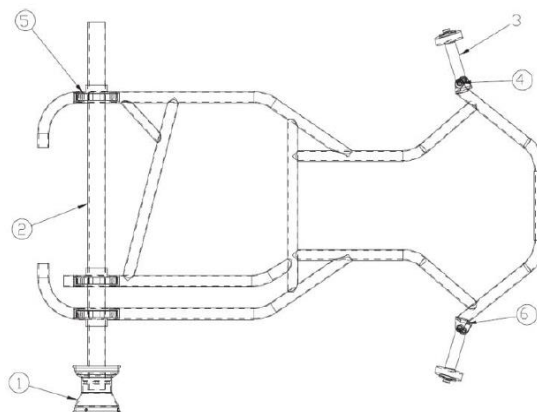


Figura 8. Parts d'un xassís genèric

Equipament de seguretat:

El vehicle ha de disposar d'una sèrie d'elements suplementaris per garantir la seguretat del pilot i els altres equips. Els sistemes de seguretat que ha d'incloure són els següents:

- Cinturó de seguretat: El seient del pilot ha d'estar proveït un cinturó de seguretat que tingui, com a mínim, 3 punts ancoratge per evitar que el pilot caigui en cas d'accident. En cas que es disposin 5 punts d'ancoratge, el cinquè punt s'ubicarà en el lloc idoni per evitar que el pilot pugui lliscar cap endavant en el cas d'una col·lisió frontal. Les diferents parts del cinturó han d'encaixar en una única sivella metàl·lica. Mentre el vehicle estigui en marxa, el pilot ha de portar correctament cordat el cinturó de seguretat
- Evacuació del pilot: El pilot ha de ser capaç d'abandonar el vehicle pels seus propis medis en qualsevol moment, sense ajuda i en un màxim de 12 segons.
- Aïllament del sistema de tracció: El vehicle ha de tenir una paret fixa, rígida i resistent que separi el pilot de tot el sistema de tracció (motor, bateria de propulsió, bateria auxiliar i rodes)

- Clàxon: Cada vehicle ha d'estar equipat amb un clàxon elèctric ubicat a la part davantera que sigui audible per tothom. Ha d'emetre un so superior a 85 dBA, mesurat a 4 metres del vehicle.
- Llums de frenada: Per garantir la seguretat de tots els participants, és obligatori que cada vehicle tingui dos pilots lluminosos, un en la part posterior, visible pels altres vehicles en circulació, i l'altre en la part frontal, visible per a membres de l'organització de l'Electrocat.
- Aturada emergència: El vehicle ha d'incloure un sistema d'aturada d'emergència que desconnecti elèctricament la bateria de propulsió respecte del sistema elèctric del vehicle. Ha de tenir dos polsadors per efectuar l'aturada d'emergència, un estarà situat dins la cabina del pilot, per tal que el pugui accionar en la seva posició normal de conducció, i l'altre estarà situat a l'exterior del vehicle, senyalitzant-lo amb una fletxa vermella de, almenys, 100 mm de llarg per 30 mm d'ample. Qualsevol dels dos polsadors ha de situar-se a la part de la carrosseria fixa.

4. Simulacions xassís 2018

En aquest apartat s'explicaran les simulacions que s'han realitzat per conèixer el comportament del vehicle. Es començarà per una explicació general de les simulacions i dels elements comuns en totes elles, i a continuació es procedirà a descriure un per un les particularitats de cada un dels estudis realitzats.

En primer lloc, com s'ha explicat anteriorment, utilitzant el software *SolidWorks* s'ha modelat el xassís amb el que ha competit l'equip CREVE el 2018 a l'Electrocat. S'ha utilitzat aquest model 3D per realitzar els anàlisi simulant diverses situacions de càrrega amb l'objectiu de determinar les tensions i deformacions del xassís en cada un dels casos. Els resultats obtinguts de les simulacions s'han utilitzat per identificar punts dèbils i punts sobredimensionats del xassís. La identificació d'aquests punts serà de vital importància en el procés d'optimització que s'explicarà més endavant, ja que conèixer el comportament del xassís actual permetrà implementar canvis que millorin aquests resultats.

Per a les simulacions d'aquest treball s'ha utilitzat el complement *Simulation* del *SolidWorks*. Aquest complement permet utilitzar models en 3D dissenyats anteriorment i realitzar simulacions sobre ells amb el mètode dels elements finits. Té un gran ventall d'opcions en quant a tipus d'elements per crear el sòlid, condicions de contorn, càrregues i esforços i visualització de resultats.

A continuació es descriuran característiques comunes en totes les simulacions realitzades:

4.1 Mètode dels elements finits

És el mètode més comunament utilitzat per programes de simulació estructural 3D, i el que s'ha utilitzat en totes les simulacions d'aquest treball. Aquest mètode numèric es basa en dividir la estructura a estudiar en dominis de menor mida no intersecats que el programa tracta com homogenis. El conjunt d'aquests dominis s'anomena "mallà".

El software utilitzat permet modificar paràmetres de la mallà, com ara la forma o la mida dels elements utilitzats. Més endavant es detallarà quines condicions de mallà s'ha utilitzat i com afecta això en els resultats obtinguts

4.2 Model

Degut a la complexitat del model, el software té grans dificultats per simular-lo com a sòlid estàndard. És per això que s'ha simplificat el xassís utilitzant estructures tipus "barra", amb les que el programari permet realitzar estudis estàtics. S'adverteix, però, que per aplicar aquesta simplificació la longitud de les barres ha de ser com a mínim 10 cops el diàmetre d'aquestes. Tot i que l'ideal seria simular el xassís com a sòlid, aquesta simplificació no

donarà uns resultats molt allunyats de la realitat, doncs quasi totes les barres del xassís compleixen aquesta condició.

Cal remarcar també que totes les simulacions que es faran en aquest treball seran en estàtic. L'anàlisi estàtic s'utilitza per avaluar el comportament d'una estructura sotmesa a forces constants en el temps.

4.3 Condicions de contorn

Hi ha una condició de contorn que s'aplica en tots els estudis que simulen situacions del xassís en pista (és a dir, en tots excepte el de torsió). Com es pot veure en la figura 9, la connexió secundària posterior amb el xassís, al fixar-se les rodes posteriors no permet que la junta es mogui en direcció de l'eix x, així que en aquests punts s'haurà d'imposar desplaçament nul en l'eix x.

Les subjeccions a les altres rodes es definiran a cada anàlisi, ja que segons la situació que es vulgui simular convé aplicar unes restriccions o unes altres.



Figura 9. Ancoratge secundari posterior

Ancoratge rodes davanteres:

Com ja s'ha comentat anteriorment al apartat de Xassís 2018 del capítol 1, una altra condició de contorn comuna en tots els anàlisi de pista són els parells aplicats als punts d'ancoratge de les rodes davanteres, que es generen pel fet que la força de reacció de la roda està desplaçada una distància del punt d'ancoratge.

Abans de calcular els moments resultants, cal comentar una simplificació que s'ha fet per el càlcul d'aquests parells. Observant la ubicació del aproximada del centre de masses del conjunt, es fa la aproximació que les rodes davanteres reben un 40% del pes i les posteriors un 60%.

Aleshores, en el punt d'unió de cadascuna de les rodes davanteres s'ha d'introduir un moment corresponent a aplicar una força de 245.25 N a una distància 0.09 m en sentit x negatiu.

$$M = F \cdot d = \frac{123.17 \cdot 9.81 \cdot 0.4}{2 \text{ rodes}} \cdot 0.09 = 22.07 \text{ Nm}$$

Ancoratge amortidors posterior:

Com ja s'ha comentat també a l'apartat Xassís 2018, es considera que a la junta dels amortidors de les rodes posteriors no transmet cap parell del tren posterior de rodes al xassís, ja que l'amortidor és quasi vertical, està alineat amb la estructura i la junta que el connecta amb el xassís té un grau de llibertat de rotació entorn l'eix X.

Ancoratge secundari posterior:

Per últim, a l'ancoratge secundari posterior (figura 9) només aplicarà la condició esmentada anteriorment de restricció del moviment en l'eix X en els estudis que es consideri que el vehicle està en pista (és a dir, en els estudis de flexió, impacte frontal, acceleració, frenada i corba.)

Per resumir, en els anàlisi esmentats anteriorment es considerarà que:

- Moviment restringit direcció x pels punts d'ancoratge posteriors secundaris.
- Moment direcció x a les rodes davanteres de valor 22.07 a cada roda.

4.4 Resultats

Al simular, generalment s'estudiaran dos resultats: les tensions i els desplaçaments del model.

En els estudis de tensions, cal tenir en compte que els elements tipus barra utilitzats no poden mostrar les tensions de Von Mises amb aquest programari, que són les més emprades al estudiar materials dúctils com és l'alumini.

Sempre que es parli de tensions en futures simulacions es parlaran de les tensions equivalents que utilitza el programa per materials dúctils i elements tipus barra, que és una combinació de tensions axials i de flexió. Es compararan aquestes tensions amb el límit elàstic del material per determinar si existeix o no deformació plàstica, i per trobar el factor de seguretat dividint els dos valors. En la majoria d'anàlisi, es considerarà segur un factor de seguretat més gran que 2.5.

En els estudis de desplaçaments, el programari permet escollir si graficar els totals (suma de tots els eixos) o els d'un eix en particular. Depenent de cada estudi s'escollirà un o altre.

4.5 Metodologia de les simulacions

A continuació es descriu el procediment general a seguir en cada una de les simulacions:

Un cop es té el model del xassís en *Solidworks*, es crea un nou anàlisi estàtic i es segueixen els següents passos:

1. Aplicar les condicions de contorn al model indicant quins punts o barres estan completament fixes o tenen el moviment restringit en algun dels eixos.
2. Aplicar les forces i parells a les que està sotmès el xassís. Les càrregues es poden aplicar en una junta en concret, una barra o sobre tot el sòlid. Les forces aplicades sobre el vehicle es poden classificar en: gravitacionals (inclouen la massa del pilot, pes dels components elèctrics i de tracció del cotxe, i pes del propi xassís) o inercials (per efecte de frenades, acceleracions, corbes o impactes bruscs).
3. Crear el mallat. S'aplica una densitat de malla fina que empra mides d'element molt petits. D'aquesta manera la discretització del model té un impacte menor en els resultats, que s'assimilaran més a la realitat i seran més precisos. Tot i així, utilitzar mides petites d'element pot portar problemes, doncs com més petita sigui la superfície de l'element, més grans es faran les tensions màximes en les singularitats creades per forces puntuals, doncs la divisió de força entre àrea tendirà a l'infinit. Per tant, els resultats s'estudiaran tenint en compte que els les tensions de punts propers a les singularitats creades per condicions de contorn o càrregues puntuals no són fiables.
4. Executar l'estudi. A l'apartat de resultats hi ha l'opció de graficar els desplaçaments totals o en un eix en particular, així com la distribució de les tensions en el sòlid.
5. Analitzar els resultats en funció dels objectius de la simulació. Comunament es busquen punts crítics on es generen concentracions de tensions, o punts on el desplaçament és elevat. S'anoten i estudien aquests resultats, que es tindran en compte en el procés d'optimització.

A continuació, s'explicaran una per una les simulacions que s'han fet al xassís per determinar el seu comportament i es definiran els objectius i particularitats de cada una tot seguint la metodologia descrita anteriorment. Cada simulació s'ha escollit curosament per estudiar un paràmetre important del vehicle, ja sigui la seva rigidesa, la seva seguretat o per estudiar el vehicle funcionant en condicions normals. Les simulacions que s'han realitzat són:

- **Torsió:** Estudi de la rigidesa a torsió.
- **Flexió:** Estudi de la rigidesa a flexió en pista.
- **Impacte frontal:** Estudi de seguretat en cas d'impacte frontal.

- **Acceleració:** Estudi de tensions i deformacions d'una acceleració en pista
- **Frenada:** Estudi de tensions i deformacions d'una frenada en pista.
- **Corba:** Estudi de tensions i deformacions del pas per corba en pista.
- **Bolcada:** Estudi de seguretat en cas de bolcada del vehicle.

4.6 Torsió

En el estudi a torsió del vehicle s'estudiaran les tensions i deformacions del xassís provocades per un moment torsor fictici aplicat horitzontalment sobre el pla de simetria del vehicle. L'objectiu d'aquest estudi és determinar la rigidesa torsional del vehicle.

En el món del automòbil, es defineix com a rigidesa torsional a la relació entre parell torsor aplicat i angle deformat del vehicle. Generalment aquest paràmetre es mesura en $\text{N}\cdot\text{m}/^\circ$, i per deformacions petites es pot assumir que té un caràcter lineal. Es pot observar aquesta relació a la formula:

$$K_{tors} = \frac{M_{tors}}{\theta}$$

On:

- K_{tors} és la rigidesa a torsional [$\text{N}\cdot\text{m}/^\circ$]
- M_{tors} és el moment torsor aplicat [$\text{N}\cdot\text{m}$]
- θ és l'angle girat entorn l'eix d'aplicació del moment [$^\circ$]

La rigidesa a la torsió és un paràmetre especialment crític en tot xassís automobilístic, ja que està íntimament relacionada amb el comportament dinàmic en corba del vehicle i amb la seva distribució de càrregues. Una major rigidesa a la torsió implica menys deformacions en els eixos anterior i posterior de les rodes, evitant així comportaments no desitjats i problemes en la dinàmica. Minimitzar la deformació dels eix davanter de les rodes és especialment important en aquest vehicle en particular, ja que no disposa d'amortidors davanters. A més a més, en la competició Electrocat els vehicles han de superar proves de "eslalom" amb cons, i el circuit de la carrera té més corbes que rectes. És per això que en el procés d'optimització es posarà especial èmfasi en augmentar la rigidesa torsional.

Cal remarcar que aquesta simulació no emula una situació real de càrrega del vehicle, i es duu a terme perquè genera un estat de càrrega torsional al xassís molt elevat. Estudiant aquest cas extrem ens permet extreure informació del comportament del xassís quan està sotmès a aquest tipus de càrregues per entendre millor els seus punts febles i poder reforçar-los.

Un cop realitzada la simulació, s'estudiaran els resultats per determinar la rigidesa torsional del vehicle, i en el procés d'optimització del xassís s'intentarà augmentar el valor d'aquesta. Amb una rigidesa torsional adequada el vehicle respondrà molt millor al passar per corbes, ja que és a les corbes on els esforços de torsió al vehicle són màxims.

Condicions de contorn:

Com ja s'ha comentat anteriorment, en aquest estudi es fixarà la part posterior del xassís, concretament els dos suports dels amortidors de les rodes posteriors, i s'aplicaran dues forces verticals de mateix mòdul i sentits oposats als dos suports de les rodes davanteres.

Com aquest és l'únic estudi que no simula una situació real no és necessari aplicar a les condicions de contorn associades a situacions en pista, com ara els moments aplicats als ancoratges de les rodes davanteres o les restriccions de moviment en l'eix X dels ancoratges secundaris posteriors.

El xassís no és simètric a causa de la barra davantera, però s'ha pogut comprovar al realitzar les simulacions que els resultats obtinguts són pràcticament iguals independentment de la direcció en la que s'aplica el moment. Tot i així, les simulacions s'han fet amb el cas que donava uns resultats més crítics, encara que la diferència fos minúscula, aplicant el moment torsor en el sentit de l'eix X positiu.

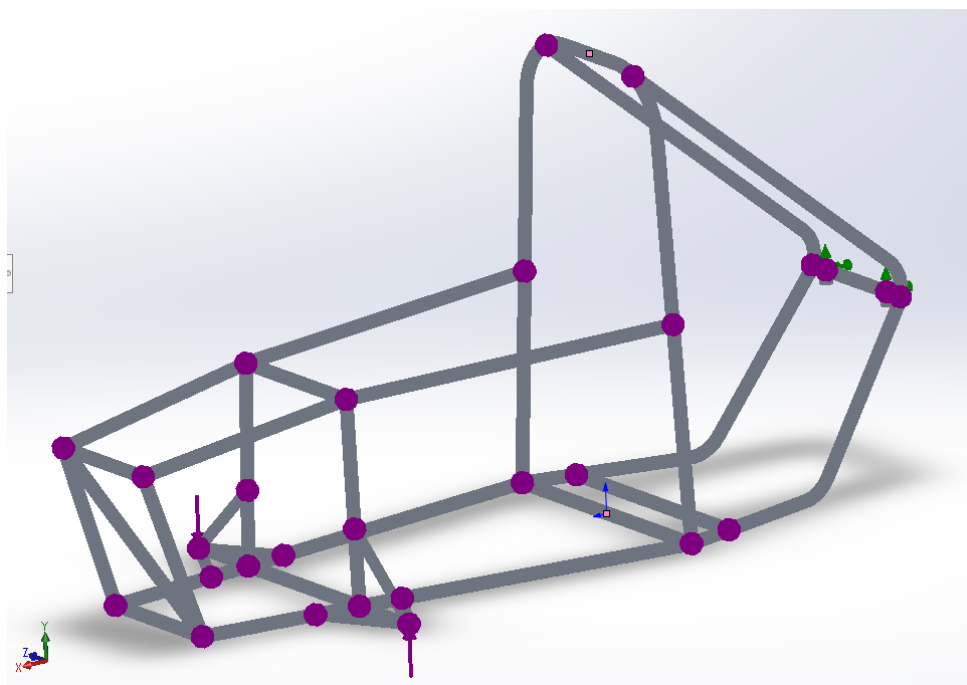


Figura 10. Condicions de contorn i càrregues a l'estudi de torsió

Càrregues:

Per determinar les càrregues a aplicar a les rodes davanteres, cal primer determinar el valor del parell torsor que actua sobre el vehicle quan aquest està a la pista. Per fer això seria necessari mesurar les acceleracions internes que actuen sobre el vehicle quan aquest passa per una corba a màxima velocitat, però l'equip no disposa de l'equipament necessari o del pressupost per realitzar aquestes mesures.

És per això que es fixarà un valor de parell comunament emprat en aquest tipus de simulacions tenint en compte les dimensions, pesos i velocitats màximes del nostre vehicle. Considerant aquests factors i prenent un elevat coeficient de seguretat, s'ha decidit simular amb un parell torsor de 1000N·m. Tenint en compte el pes (120kg aproximadament amb pilot) i la velocitat màxima (30 km/h aproximadament) que assoleix el vehicle, aquest valor és molt superior al que patirà el xassís en competir.

S'ha seleccionat un valor elevat ja que, com ja s'ha comentat anteriorment, l'objectiu d'aquesta prova no és simular una situació real de càrrega, sinó veure qualitativament el comportament del xassís davant d'esforços de torsió per detectar punts a optimitzar. És per això que si a l'apartat de resultats s'obté un valor de tensions màximes superiors a les del límit elàstic del material o unes deformacions molt elevades no ens hem d'alarmar, doncs no es tracta d'un estat de càrrega en pista real.

Un cop seleccionat el parell de 1000N·m amb el que es simularà, calculem les forces que s'aplicaran al vehicle com a moment torsor dividit entre distància perpendicular a la direcció del moment. Cal tenir en compte que el parell s'aplicarà mitjançant dues forces, per tant per calcular-ne una cal dividir-lo entre dos.

$$F = \frac{(M_{tors}/2)}{b}$$

On:

- F és la força aplicada a un suport davanter de roda [N]
- M_{tors} és el moment torsor total [N·m]
- b és la distància perpendicular del punt d'aplicació de la força al pla de simetria del vehicle.

Si $M_{tors} = 1000\text{N}\cdot\text{m}$ i $b = 382,5\text{mm}$, obtenim que les forces a aplicar han de ser de 1307,19N per cada node.

Anàlisi de resultats:

Com ja s'ha explicat anteriorment, la simulació de torsió no és un cas real de càrrega del xassís, per tant els desplaçaments totals no aporten informació significativa.

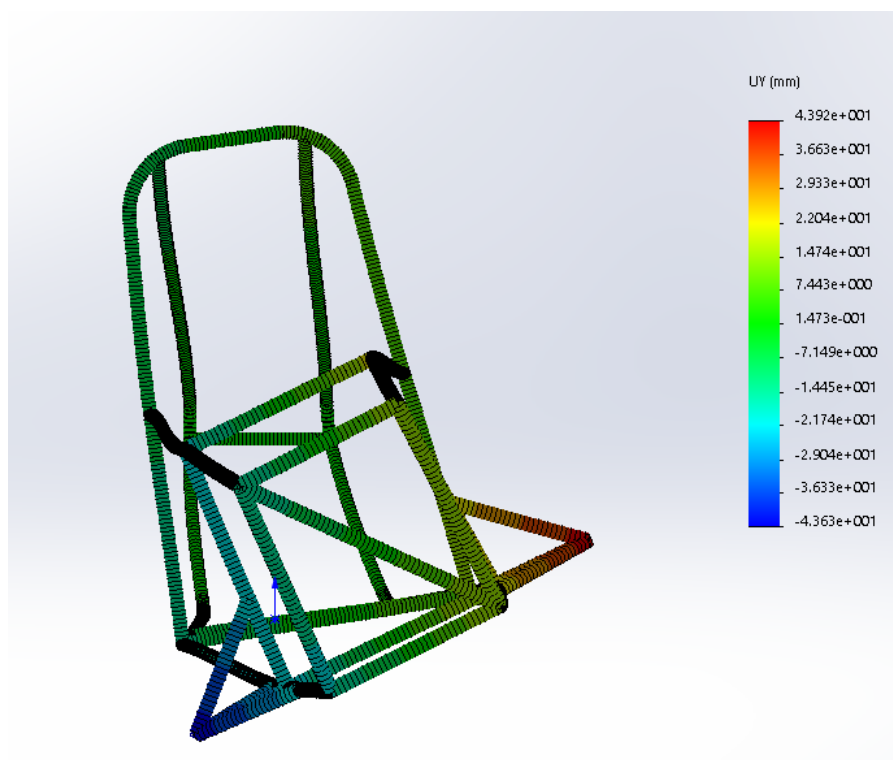


Figura 11. Vista frontal dels desplaçaments en Y en l'assaig de torsió

Per obtenir K_{tors} cal trobar l'angle girat pel xassís al deformar-se per el moment aplicat. L'angle s'ha calculat amb els desplaçaments verticals (eix Y) dels punts d'aplicació de la força.

S'observa a la figura anterior (figura 11) que els punts de màxim i mínim desplaçament en Y es corresponen amb els punts d'aplicació de la força. Els seus desplaçaments són de +43,92mm i de -43,63mm. Tenint en compte que els punts estan separats 765mm i que la barra que els uneix pràcticament no s'ha desplaçat en l'eix X, podem obtenir per trigonometria l'angle girat per la barra respecte el pla horitzontal, que és de 6,529°.

Aplicant la formula $K_{tors} = \frac{M_{tors}}{\theta}$, s'obté que $K_{tors} = 153,163 \text{ [N}\cdot\text{m}^\circ]$

Una rigidesa torsional de 153,163 N·m/° és un valor alarmantment més baix del esperat. Per posar aquesta xifra en context, un automòbil comercial convencional pot tenir valors de rigidesa torsional des de 5600 N·m/° (BMW Z3) fins a 40500 N·m/° (Rolls Royce Phantom). En el cas de vehicles de competicions amateurs, com és el cas, aquest paràmetre se sol fixar en valors entre 500 N·m/° i 3000 N·m/°.

Aquesta baixa rigidesa a torsió pot explicar-se amb el fet que l'equip va posar un gran èmfasis a l'hora de reduir al màxim el pes del vehicle, i per això van escollir un material lleuger (alumini) i van limitar el nombre de barres estructurals del xassís. El baix mòdul de Young de l'alumini i la manca de barres que donin més rigidesa expliquen aquests resultats.

Feta aquesta reflexió, un dels objectius més crítics que es contemplaran com a criteris d'optimització serà augmentar la seva rigidesa torsional del xassís. S'ha fixat com a objectiu inicial obtenir una K_{tors} d'almenys 1000 N·m/º.

A continuació es realitza un estudi de les tensions patides al xassís amb les condicions de torsió esmentades anteriorment.

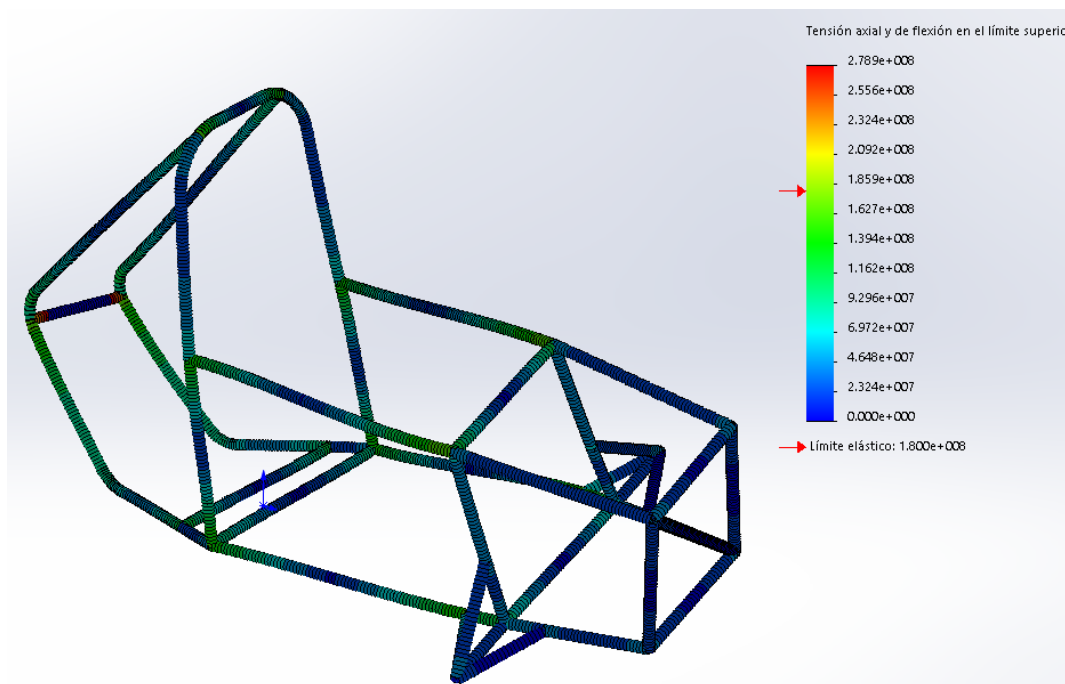


Figura 12. Distribució de tensions en l'assaig de torsió

A la figura anterior (figura 12) es pot apreciar que les tensions de la estructura superen o són properes en molts punts al límit elàstic de 180 MPa de l'alumini. Com ja s'ha comentat anteriorment això no és motiu d'alarma, doncs aquest estudi és un estat de càrrega fictici extrem, i els seus resultats només s'utilitzaran de manera qualitativa.

Estudiant els resultats obtinguts, s'observa que la tensió màxima se situa a una singularitat provocada al fixar els nodes de les rodes posteriors en les condicions de contorn.

De la mateixa manera, s'observa que les tensions més elevades del xassís es concentren a la majoria de juntes d'aquest, especialment a les de la part posterior.

És en aquests punts, doncs, que caldrà reforçar la estructura en el procés d'optimització. D'aquesta manera s'aconseguirà una distribució de tensions més uniforme al llarg del vehicle, s'augmentarà la seva rigidesa torsional i es disminuirà el risc de fallida del material.

4.7 Flexió

Degut al fet que les masses més significatives del xassís (el pilot, el motor i la bateria) estan allunyades dels punts de contacte amb el terra, la estructura està sotmesa permanentment a esforços de flexió.

Tot i així, la rigidesa a flexió no és mai un factor crític en el procés de dimensionat d'un vehicle, ja que són molt més restrictives les condicions de rigidesa torsional. És per això que si el xassís s'optimitza amb els criteris imposats a l'estudi de torsió, és segur que la flexió provocada pels pesos dels components no serà crítica.

No obstant això, es realitzarà l'anàlisi per veure quin són els punts de màximes tensions i deformacions del xassís, i es comprovarà que no hi hagi risc de fallida del material per esforços a flexió.

Condicions de contorn:

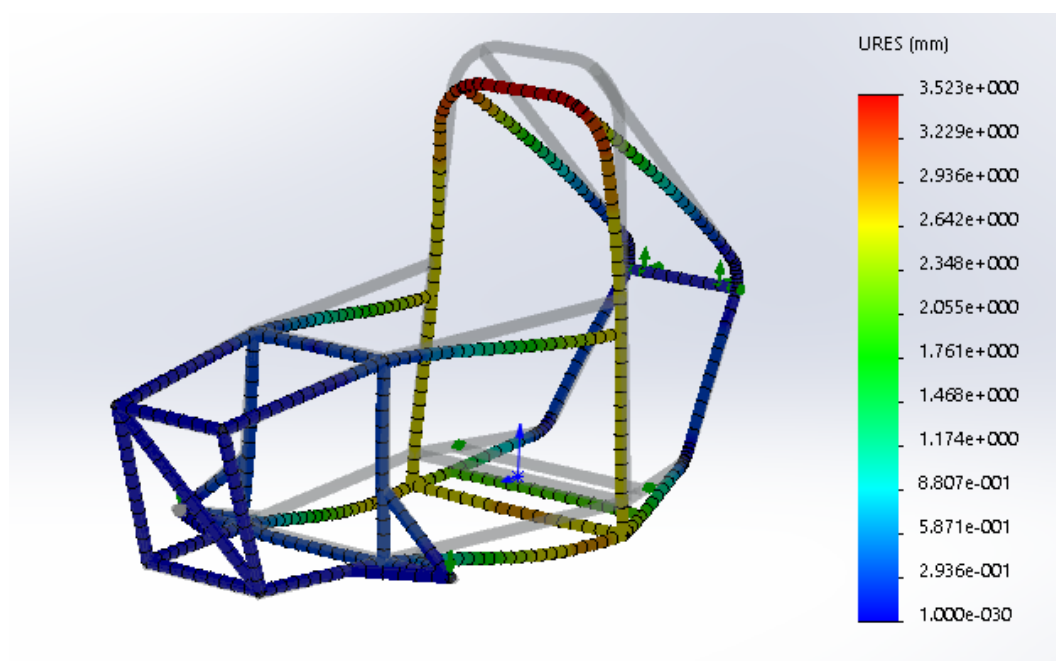
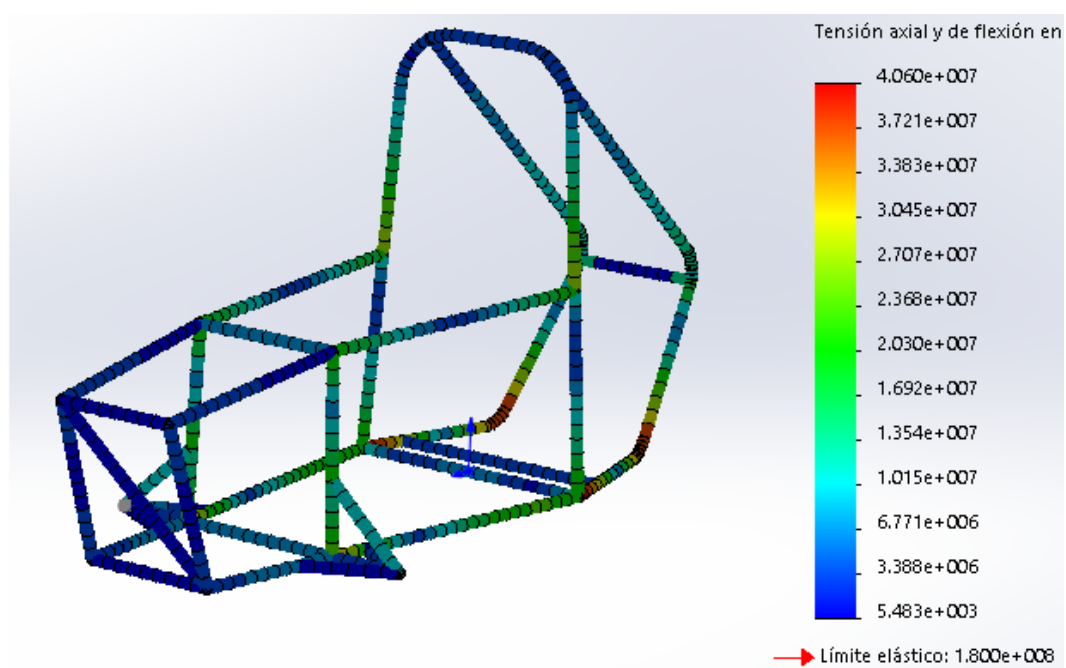
Per realitzar aquest estudi s'han de fixar els quatre rodes per comprovar l'efecte que té el pes del propi xassís, del pilot i dels diferents components del cotxe en les deformacions totals i les tensions.

Per simular això, s'han fixat completament els punts d'ancoratge dels amortidors posteriors amb el xassís, mentre que als punts d'ancoratge de les rodes davanteres només s'ha fixat el moviment en l'eix Y.

A més a més, al tractar-se d'un estudi que simula una situació en pista del vehicle, s'inclouran les condicions pròpies a les simulacions en pista que s'han comentat anteriorment. Aquestes són restringir el moviment en l'eix X dels ancoratges secundaris posteriors i aplicar els parells corresponents als ancoratges de les rodes davanteres.

Càrregues:

En aquest assaig només actua la força de la gravetat aplicada a tots els cossos del cotxe que aporten massa. Els punts i barres on s'aplicaran totes les forces estan descrits en detall en l'apartat del capítol 1 "Xassís 2018". Aquestes forces s'aplicaran en el sentit de l'eix Y negatiu.

Resultats:*Figura 13. Desplaçaments totals en l'assaig de flexió**Figura 14. Distribució de tensions en l'assaig de flexió*

Anàlisi de resultats:

Com era d'esperar, ni les deformacions ni les tensions màximes suposen un problema. Les deformacions màximes són de 0,65 mm, un valor molt baix. Pel que fa a la distribució de tensions, el valor màxim de 40,6 MPa fa que s'obtingui un factor de seguretat de 4.43.

En vista d'aquests resultats es confirma la suposició inicial que s'ha fet al respecte de la rigidesa a flexió, que no és un paràmetre crític per al disseny del xassís. Per tant, en la futura optimització del xassís no es buscarà millorar els resultats d'aquesta prova, doncs no és crítica.

4.8 Impacte frontal

L'estudi de l'impacte a la part frontal del vehicle, junt amb el de la part lateral, són els més importants per assegurar la integritat estructural del xassís i així, garantir la seguretat del pilot. En cas que es produeixi un accident, cap part del xassís i de la carrosseria poden arribar a impactar amb el pilot. Per tant, en aquest estudi es considerarà que el màxim desplaçament que es pot produir en les zones més properes al pilot serà de 100 mm.

És important puntualitzar que aquest estudi suposa unes certes condicions d'impacte frontal, però és sabut que en una competició és impossible predir en quina direcció es patirà un impacte ni com serà aquest. Per això s'estudia aquest cas genèric d'impacte frontal, que donarà una idea general del comportament del vehicle enfront d'impactes davanters, però que en cap cas serà aplicable a qualsevol situació d'impacte que es pugui donar quan el vehicle estigui en pista.

Per realitzar aquest estudi, s'ha suposat el cas en que el vehicle pateix un impacte a una velocitat de 45 km/h. Amb quasi total certesa, aquesta velocitat és major que la màxima que pot assolir el vehicle, però com ni l'equip CREVE ni l'Electrocat disposa d'aparells que puguin mesurar exactament la velocitat màxima del monoplaça del 2018 s'ha optat per fer l'estudi amb una velocitat més alta. Així s'assegura que les tensions i deformacions obtingudes són majors que patiria el vehicle en un xoc frontal a la seva velocitat màxima real.

Amb aquesta velocitat s'ha de calcular la desacceleració que pateix el vehicle considerant que xoca contra un sòlid totalment rígid. S'ha escollit el cas més extrem de tots perquè, si les deformacions en el xassís estan dintre del límit, es podrà assegurar que en qualsevol altre xoc (Contra un element no tant rígid que pugui absorbir energia - p.e. un altre cotxe) el xassís aguantarà. En aquest cas, s'ha considerat que el temps d'impacte contra un cos rígid és d'uns 0,15s.

El primer pas per calcular la força resultant és definir la força G a la que es sotmet el xassís en desaccelerar bruscament.

Considerant aquesta formula es pot calcular la força g present en un xoc frontal:

$$G = \frac{\left(\frac{V_{inicial} - V_{final}}{T_{impacte}} \right)}{g},$$

on $V_{inicial}$ és la velocitat en l'instant de la col·lisió, V_{final} és la velocitat després de la col·lisió, $T_{impacte}$ és el temps d'impacte amb un element completament rígid i g és l'acceleració de la gravetat.

Substituint els valors definits anteriorment, es troba una força G de 8,497.

$$G = \frac{\left(\frac{12,5 - 0}{0,15} \right)}{9,81} = \frac{83,33}{9,81} = 8,497 \text{ g}$$

Un cop definida quina és la força g que actua, la força resultant es pot calcular com:

$$F = m \cdot G \cdot g \quad \text{en } N$$

On m és la pròpia massa de tot el vehicle amb el pilot i tot els components inclosos, G és el valor de la força G en l'impacte i g és l'acceleració de la gravetat.

Finalment, resulta una força $F = 123.17 \cdot 8,497 \cdot 9,81 = 10266.9 \text{ N}$.

Condicions de contorn

Per simular les condicions d'impacte, és important assignar correctament els punts fixos i les diverses restriccions de moviment del model.

Primerament, es fixa la part posterior del vehicle, més concretament els ancoratges dels amortidors posteriors. Es fa aquesta hipòtesis perquè, com el que ens interessa es veure les deformacions a la zona frontal, es fixa la part més allunyada del punt d'aplicació de la força. D'aquesta manera s'eviten singularitats que estiguin properes a la zona d'estudi.

La segona condició que s'ha d'aplicar és la restricció de moviment a les rodes davanteres en l'eix vertical, ja que s'ha considerat que les rodes no es separaran del terra en aquest estudi.

A més a més s'aplicaran les condicions de contorn pròpies de les simulacions de pista, que com ja s'ha explicat anteriorment són l'aplicació dels corresponents parells al ancoratge de les rodes davanteres i la restricció del moviment en l'eix x dels ancoratges secundaris posteriors.

Càrregues

Com s'ha comentat anteriorment, la càrrega a aplicar en aquest anàlisi és una força resultant de l'impacte de 10266.9 N. S'ha considerat que la col·lisió es produeix a la part davantera del xassís, així doncs aquesta força és repartirà de forma equitativa entre les cinc barres corresponents. Aleshores, el valor que s'ha d'introduir en el programa de simulació és la força per unitat de longitud, que és la força total entre la llargada total de totes les barres:

$$F_x = \frac{F}{L} = \frac{10266.9 \text{ N}}{1906,89 \text{ mm}} = 5384,11 \text{ N/m}$$

A la següent il·lustració (figura 15) es pot observar totes les forces aplicades a cadascuna de les barres (cercle verd) i els punts del xassís que s'han fixat completament (cercle blau) o només en un eix (Cercles vermells).

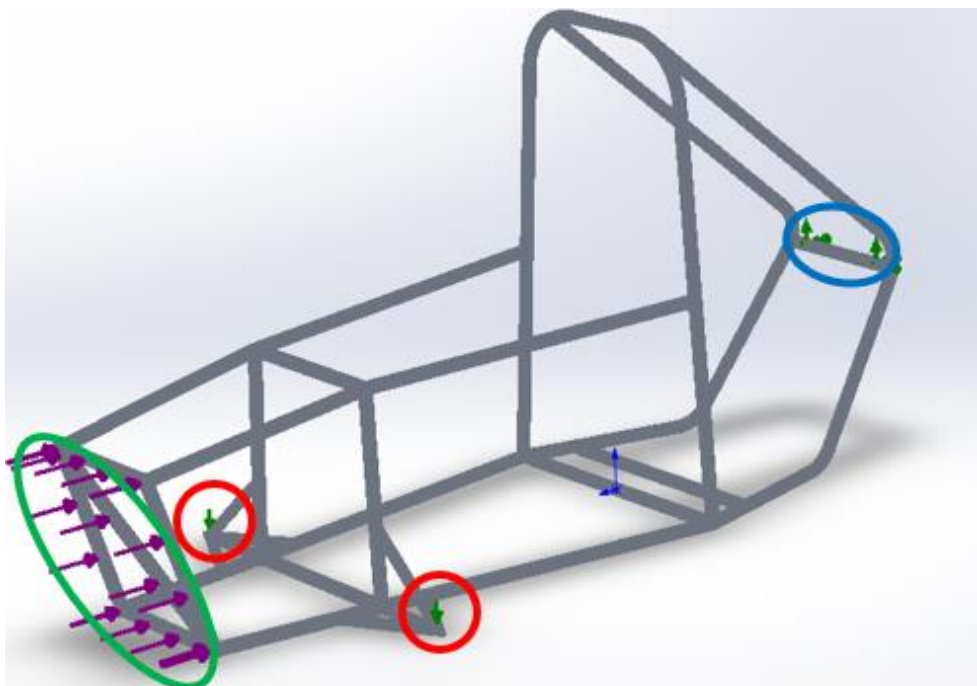


Figura 15. Condicions de contorn i forces aplicades en l'assaig d'impacte frontal

Resultats

Un cop definits els punts amb restricció de moviment, les forces corresponents i creada la malla al model, es procedeix a analitzar només les deformacions en el prototip. L'objectiu d'aquest anàlisi és observar el comportament del xassís després d'un impacte brusc, i verificar que el pilot no corre perill, que no hi ha cap component o barra que pugui tocar-lo. És per això que només s'estudiarà el gràfic de deformacions, i no es tindrà en compte les tensions màximes, doncs ja s'assumeix que en el cas d'un impacte a màxima velocitat les tensions del vehicle superaran el límit elàstic i el cotxe quedarà deformat.

Graficant les deformacions al llarg de tot el xassís, obtenim la següent peça deformada (figura 16).

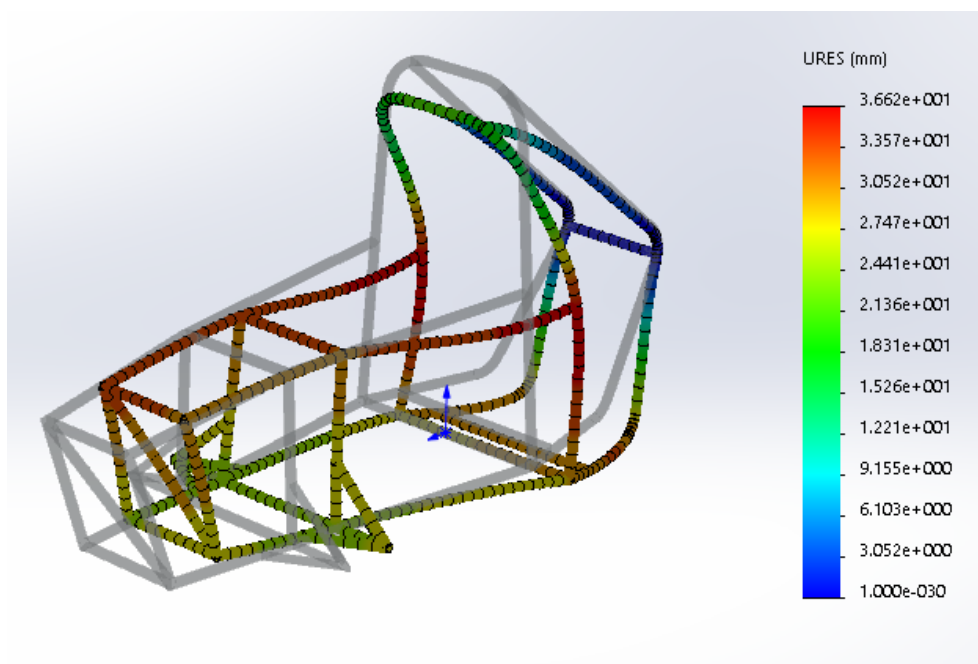


Figura 16. Desplaçaments totals en l'assaig d'impacte frontal

Anàlisi de resultats:

Com ja s'ha comentat, en aquest estudi només s'estudiaran de les deformacions que pateix el xassís, posant especial èmfasi en els punts que poden arribar a impactar amb el pilot.

Les barres que presenten un major perill són les que envolten el pilot, així que l'estudi es centrarà sobretot en les deformacions de la cabina del pilot

A la figura anterior es pot observar com el desplaçament màxim en tot el xassís és de 3,66 cm. Tenint en compte que inicialment s'ha postulat que per assegurar la seguretat del pilot el desplaçament de les barres que el rodegen no pot superar els 10 cm, que els màxims desplaçaments del xassís siguin de 3,66 cm porta a pensar que no hi haurà cap punt que contacti amb el pilot després d'un xoc frontal.

Tot i això, es creu que millorant la estructura frontal del vehicle de cara al nou disseny es pot incrementar la seguretat del pilot, doncs com ja s'ha comentat anteriorment els impactes són de naturalesa poc previsible, i els resultats satisfactoris obtinguts no volen dir que per unes condicions d'impacte diferents a les simulades el pilot no pugues prendre mal. Una bona opció per reforçar el frontal seria afegint-hi barres de reforç triangulades, que podrien ajudar a repartir la força de l'impacte rebut.

A més, una altre part on es podrien implementar millores és a l'arc de seguretat, doncs és a la seva base on s'obtenen les majors deformacions de la simulació, i aquest es considera un component de risc al estar al costat del seient del pilot. Afegir una barra de reforç triangulada a la base de l'arc principal podria ser una solució al problema.

4.9 Acceleració

En l'estudi d'acceleració es simularà l'efecte sobre el xassís de l'acció de la màxima acceleració possible que pot actuar sobre el vehicle en pista, observant que les deformacions i les tensions a les que està sotmesa l'estructura siguin raonables i no superin els valors límit.

Condicions de contorn

Per tal que la simulació s'assembli el màxim possible a la realitat, cal fixar les rodes davanteres en totes direccions, ja que en el procés d'acceleració, els punts on actuen forces són els de l'eix posterior, que és on el vehicle té la tracció.

La segona condició que s'haurà d'aplicar és una restricció del moviment en l'eix Y del ancoratge dels amortidors posteriors. És necessari fer aquesta restricció doncs durant el procés d'acceleració les rodes no es separen en cap moment del terra.

Al ser un estudi que simula una situació en pista del vehicle, s'afegeixen també les condicions de contorn pròpies dels estudis en pista, que són l'aplicació dels parells corresponents al ancoratge de les rodes davanteres i la restricció de moviment en l'eix X de l'ancoratge secundari posterior.

Càrregues

Tal com s'ha dit en l'apartat anterior, s'ha d'aplicar sobre el xassís la màxima acceleració capaç de generar el vehicle. A partir de dades que ha facilitat el fabricant del xassís 2018, s'ha considerat que el vehicle és capaç d'accelerar de 0 a 45 km/h en 10 segons, així que l'acceleració a la que estarà sotmès el vehicle és de 1.25g. A partir d'aquest valor es calcula la força que s'aplicarà, de 1510.37 N, i que es distribuirà equitativament entre les dues rodes posteriors, i tindrà una direcció en el sentit de l'eix X negatiu.

A més, per aquest estudi s'ha de tenir en compte l'efecte que té la gravetat sobre el xassís. Aleshores, s'ha d'afegir per cada sòlid del vehicle quin efecte té la gravetat sobre ells mateixos.

Component	Pes	Força gravitacional
Xassís	8.17 kg	80.147 N
Pilot	75 kg	735.75 N
Motor, variador, bateria...	40 kg	392.4 N

Punt d'aplicació	Acceleració	Força tracció
Ancoratge secundari posterior	1.25g	755.154 N per roda

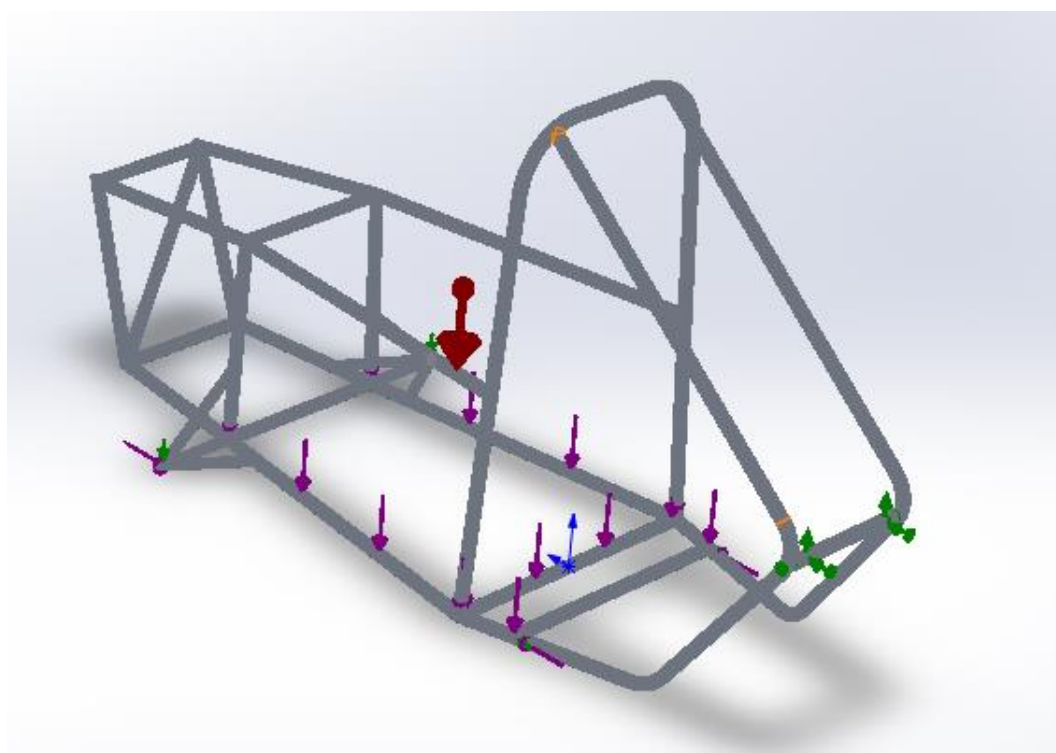


Figura 17. Condicions de contorn i forces aplicades en l'assaig d'acceleració

Resultats:

Un cop introduïts en el model totes les condicions de contorn i les càrregues corresponents, es realitza la malla i s'obtenen els següent resultats de tensions (Figura 18) i de deformacions (Figura 19).

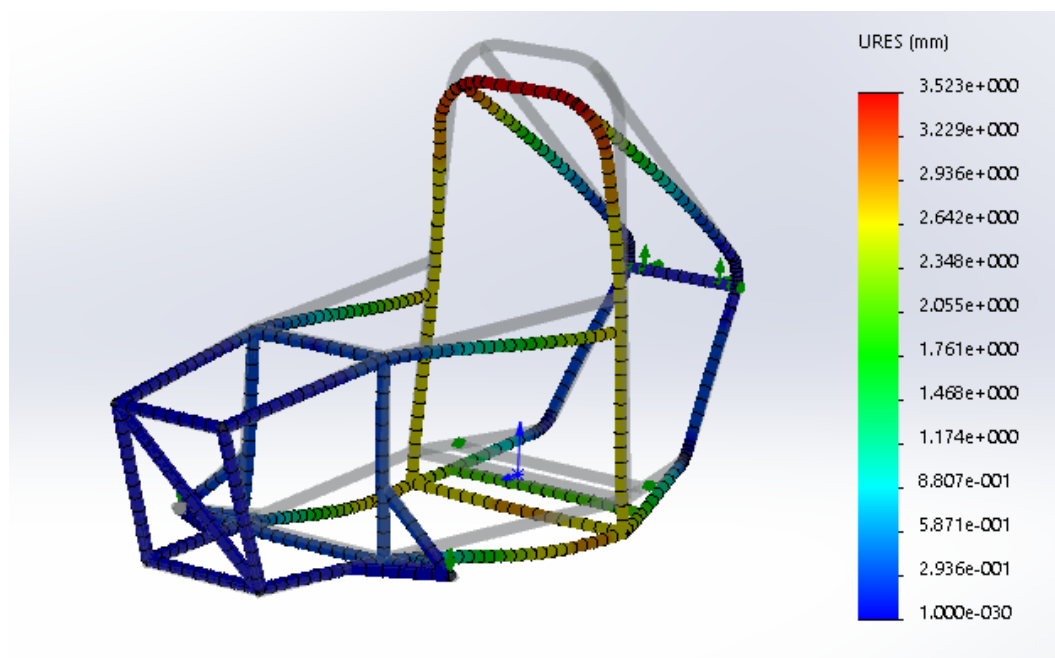


Figura 19. Desplaçaments totals en l'assaig d'acceleració

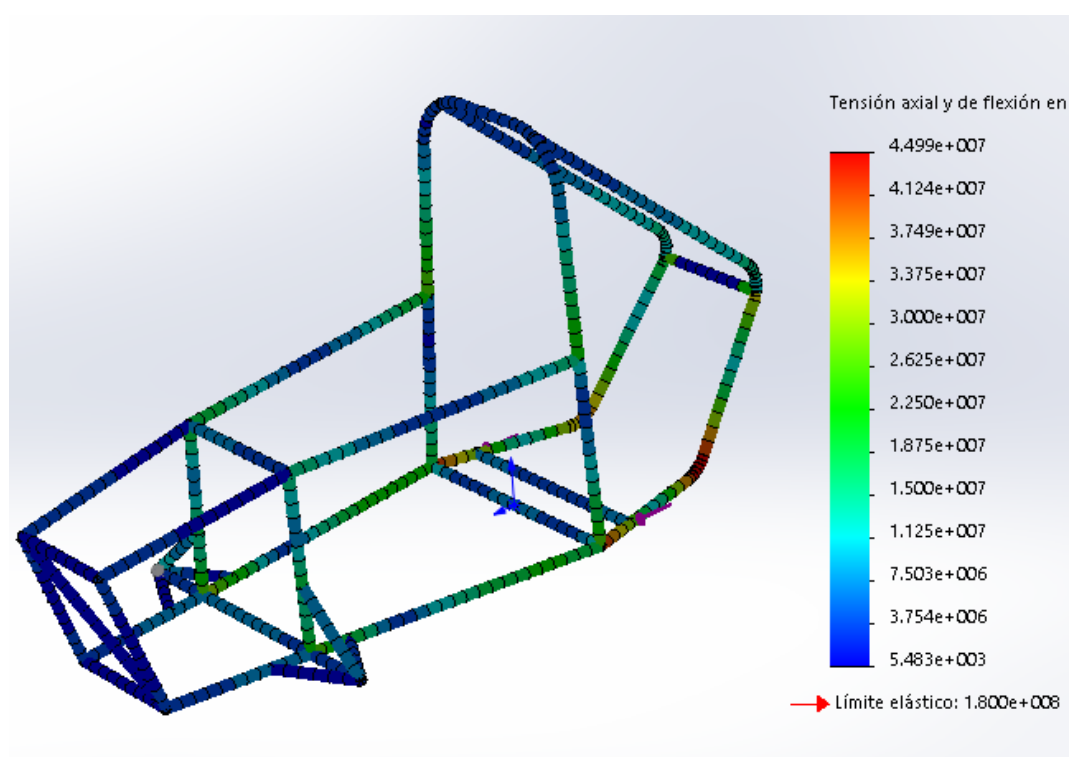


Figura 18. Distribució de tensions en l'assaig d'acceleració

Anàlisi de resultats

El desplaçament màxim obtinguts en aquest anàlisi val 3.56 mm, que és un valor poc preocupant tenint en compte les dimensions del vehicle.

Comparant la deformada resultant d'aquest anàlisi amb els resultats de l'anàlisi de flexió realitzat anteriorment i veient la gran similitud entre ambdós resultats, es pot afirmar que el xassís principalment es deforma per l'efecte de la gravetat sobre les masses del vehicle, i que l'efecte que té l'acceleració sobre el cotxe és menyspreable.

Pel que fa a les tensions, s'ha obtingut un valor màxim de 44.99 MPa, molt per sota del límit elàstic de l'alumini que és 180MPa. (Coeficient de seguretat de 4,00)

Considerant aquests resultats, s'ha decidit que anàlisi d'acceleració no serà rellevant a l'hora d'optimitzar el xassís ja que els esforços i deformacions que es produeixen no creen cap punt crític greu en l'estructura.

4.10 Frenada

La simulació de la frenada és molt similar a la prova d'acceleració, amb la diferència que es canvien el sentit i els punts d'aplicació de la força.

Condicions de contorn

El cotxe dissenyat conté un disc de fre a cada roda, així que per fer l'anàlisi es fixaran completament els punts d'ancoratge amb els amortidors posteriors i, per deixar un grau de llibertat i així poder observar com es deforma, no es permetrà el moviment vertical a les rodes davanteres. D'aquesta manera també es té en compte el fet que en una frenada cap de les rodes es separa del terra. A la figura 20 es pot observar les condicions de contorn aplicades.

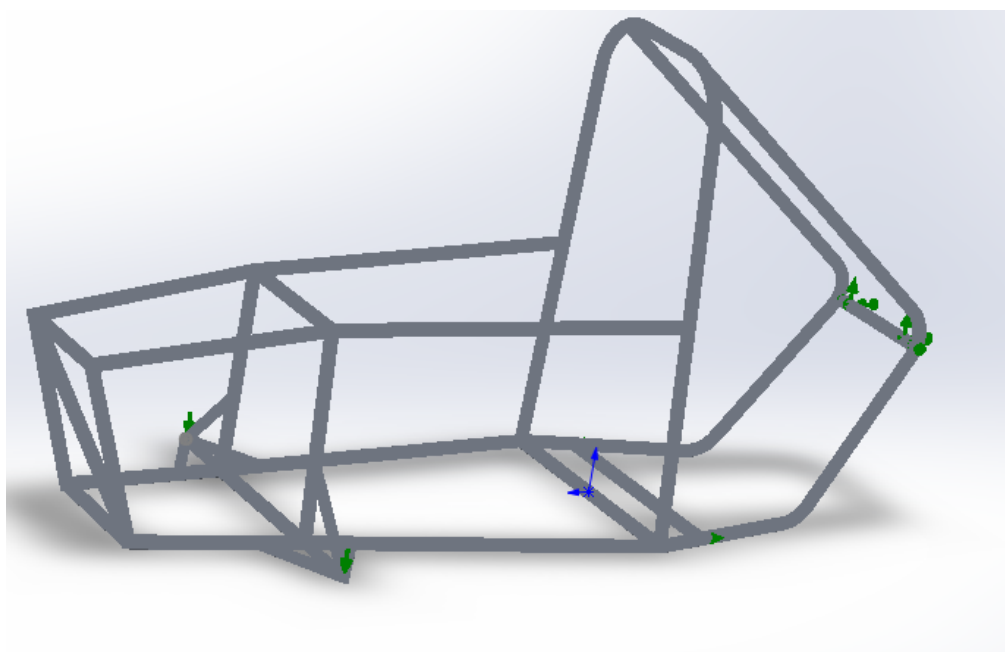


Figura 20. Condicions de contorn a l'assaig de frenada

A més a més, s'aplicaran les condicions de contorn pròpies dels estudis en pista descrites anteriorment, que són els parells aplicats als ancoratges de les rodes davanteres i la restricció del moviment en l'eix X del ancoratge secundari posterior.

Càrregues

Com en el cas de la prova d'acceleració, una de les forces que s'ha d'introduir al model es l'acció de la gravetat sobre el xassís. Així que s'aplicaran forces en sentit vertical a cadascuna de les masses que conté el vehicle.

Component	Pes	Força gravitacional
Xassís	8.2 kg	80.147 N
Pilot	75 kg	735.75 N
Motor, variador, bateria...	40 kg	392.4 N

L'altre força que s'ha d'aplicar es la força d'inèrcia de frenada que produeix el vehicle. Segons el reglament de l'Electrocat, el dia de la competició cada vehicle ha de realitzar una sèrie de proves per verificar que els vehicles s'ajusten a uns mínims tècnics exigibles, si qualsevol cotxe no supera alguna d'aquestes proves, no tindrà accés a la cursa. Una d'aquestes proves, es la prova de frenada. Per superar-la el vehicle ha de ser capaç de frenar per complet en una distància màxima de 2 metres a una velocitat mínima de 20 km/h, en una pista de 2,5 metres d'ample.

Sabent això, es calcula quant val la desacceleració i la força de frenada corresponent.

$$a = \frac{v_{inicial}^2 - v_{final}^2}{2 \cdot x} = \frac{6,94^2 - 0^2}{2 \cdot 2} = 12,04 \frac{m}{s^2} = 1,23 g ;$$

$$F = a \cdot m = 12,04 \cdot 123,17 = 1482,96 N$$

Aquesta és la força considerant tot el cotxe com un sòlid uniforme, però com la distribució de masses no es uniforme, s'ha d'aplicar l'acceleració d'1,23g que afecta a tot el xassís, el pilot i els components del cotxe.

La força del xassís es distribuirà al llarg del mateix, i les forces del pilot i del motor, variador i altres components s'aplicarà als punts definits a l'apartat "Xassís 2018" del capítol 1.

Component	Pes	Força acceleració
Xassís	8.17 kg	98.94 N
Pilot	75 kg	904.97 N
Motor, variador, bateria...	40 kg	482.65 N

A la figura 21 es pot observar les forces aplicades en tot el xassís.

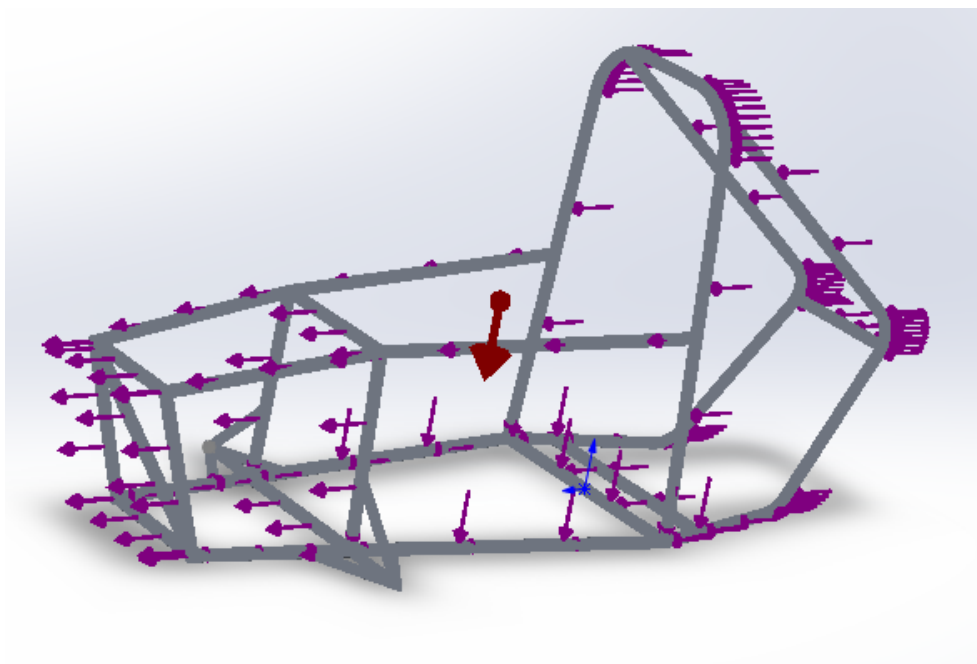


Figura 21. Forces aplicades a l'assaig de frenada

Resultats

Un cop definits els punts amb restricció de moviment, les forces corresponents i creada la malla al model, es procedeix a analitzar les deformacions i la distribució de tensions en el prototip.

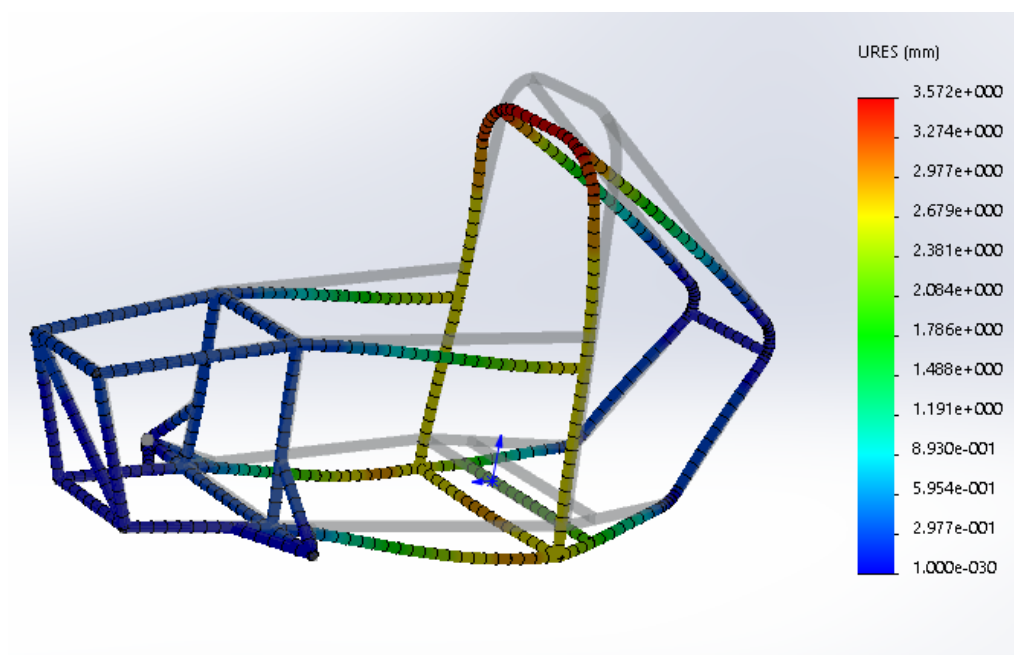


Figura 22. Desplaçaments totals en l'assaig de frenada

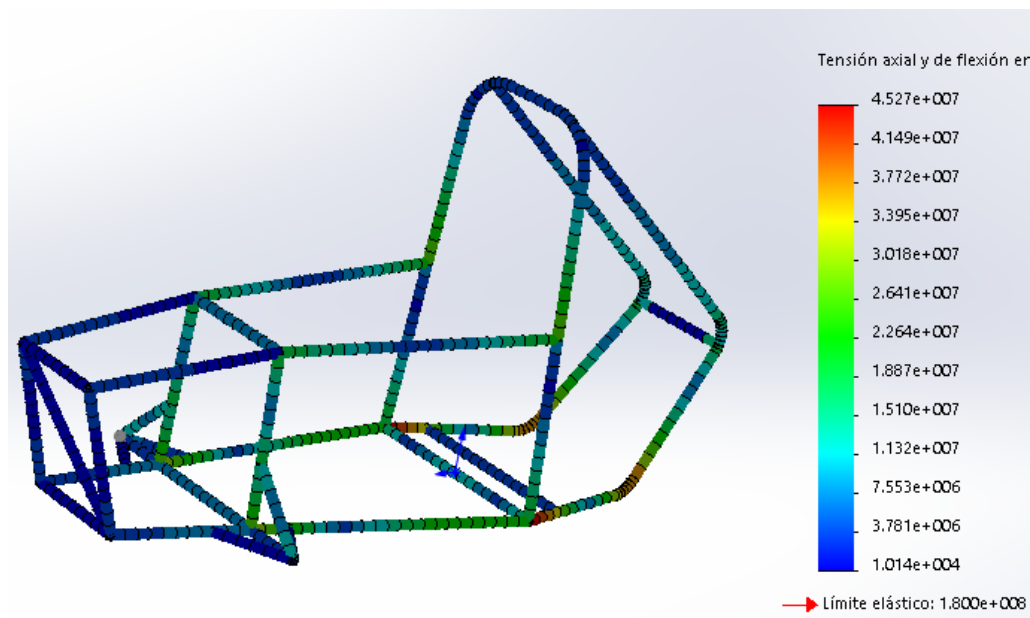


Figura 23. Distribució de tensions en l'assaig de frenada

Anàlisi de resultats

Observant els gràfics obtinguts es veu com no hi ha cap punt del xassís que superi, ni tan sols, s'apropi al límit elàstic. El valor màxim es de 45.27 MPa, tenint un factor de seguretat de 3.97, el qual es un valor bastant alt. Així que, segons aquest anàlisi, no hi ha cap part que s'hagi d'optimitzar per realitzar la frenada.

Pel que fa al gràfic de deformacions, el valor màxim s'obté al frontal del xassís i val 3.57mm. No es un valor alarmant, però si que s'hauria de millorar una mica la resistència del xassís per arribar a un valor al voltant de 1 - 1.5 mm.

4.11 Corba

En aquest anàlisi s'analitzarà el comportament en corba del xassís. És una prova important ja que s'avalua la capacitat del vehicle per aguantar esforços i càrregues laterals.

En una competició com l'Electrocat, és molt important que el vehicle que competeixi tingui un bon comportament a les corbes ja que, principalment, el circuit té en proporció un major nombre de corbes que de rectes. Per tant, tenir un bon pas per corba serà un punt diferencial.

Condicions de contorn

Pel que fa a les restriccions de moviment, s'utilitzen les mateixes que l'estudi de frenada:

- Restricció total en l'ancoratge dels amortidors posteriors
- Restricció en l'eix x en l'ancoratge secundari posterior
- Restricció en l'eix y en l'ancoratge rodes davanteres

En aquest estudi s'estudiarà la força centrífuga sobre el vehicle, que té com a direcció la perpendicular del pla de simetria del xassís. Doncs, per poder observar les deformacions del xassís en aquesta situació, s'han de fixar les rodes en la direcció d'aquesta força, és a dir, restricció de moviment en l'eix z en tots els punts de contacte amb les rodes.

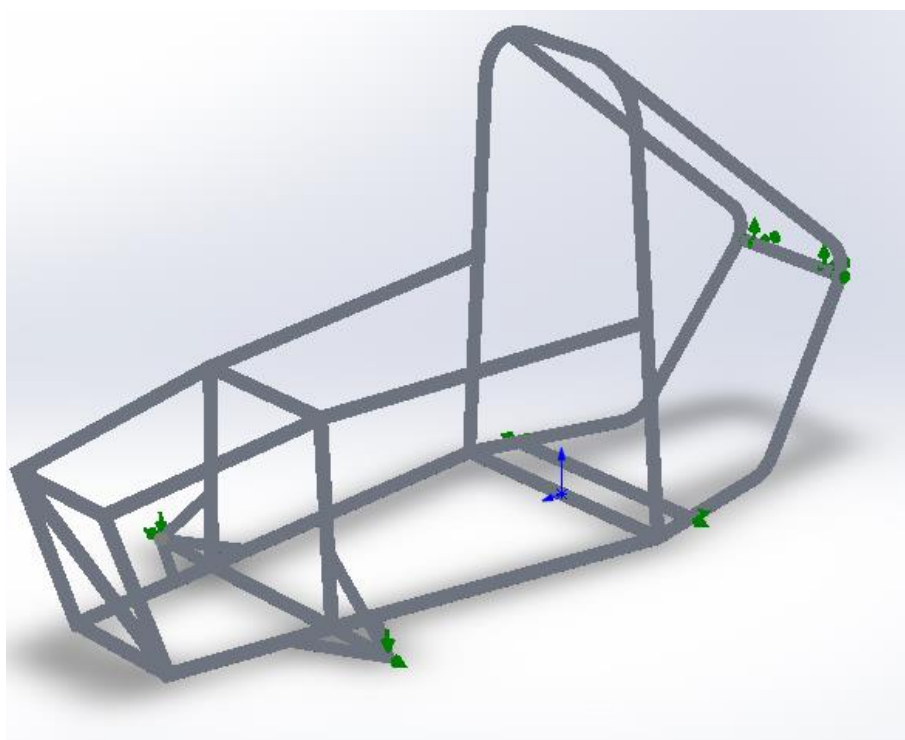


Figura 24. Condicions de contorn en l'assaig de pas per corba

Càrregues

Les forces que afecten al xassís en aquesta simulació seran verticals (pes propi de cada component/sòlid) i laterals (forces centrífugues a cada cos amb massa).

Les forces per efecte de la gravetat s'aplicaran sobre els punts explicats en l'apartat "Xassís 2018" i els valors de cadascuna són els següents.

Component	Pes	Força gravitacional
Xassís	8.2 kg	80.147 N
Pilot	75 kg	735.75 N
Motor, variador, bateria...	40 kg	392.4 N

Per saber quina força centrífuga aplicar, s'ha fet recerca sobre altres monoplaques similars al que s'està dissenyant, per trobar quin valor d'acceleració centrífuga son capaços de suportar. Doncs, s'ha decidit utilitzar una acceleració d'1g ja que, per la velocitat màxima que obtenen els vehicles de l'Electrocat, és un valor raonable (una acceleració d'1g equival al pas per una corba de 3 m de radi a uns 20 km/h).

Les forces centrífugues s'apliquen cap al centre de gir però en sentit oposat. Així que, al programa emprat per realitzar tots els anàlisis, s'hauria de definir des de cada element, una recta que l'uneixi amb el centre de gir teòric. Per simplificar el disseny i facilitar la introducció d'aquestes forces, s'ha determinat que totes les forces centrífugues que introduïm al model tindran una direcció Z amb sentit oposat al gir desitjat.

Per tant, com l'acceleració és d'1g, el valor de les forces serà idèntic que les gravitacionals però en la direcció esmentada.

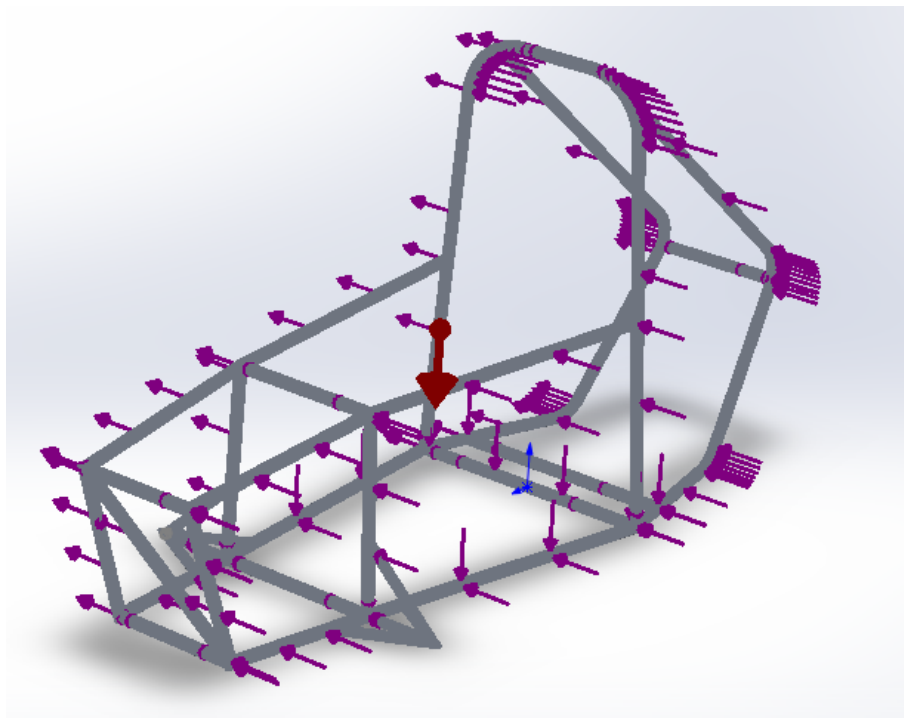


Figura 25. Forces aplicades a l'assaig de corba simulant un gir a l'esquerra

Resultats

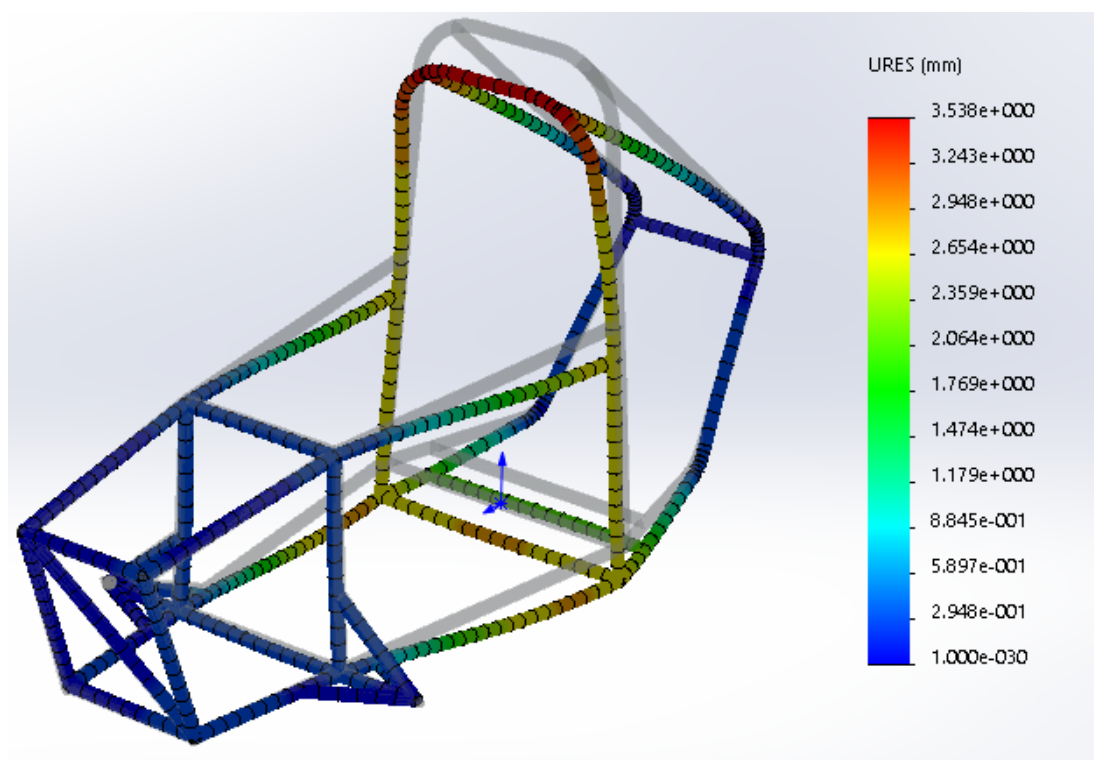


Figura 26. Desplaçaments totals en l'assaig de corba simulant un gir a l'esquerra

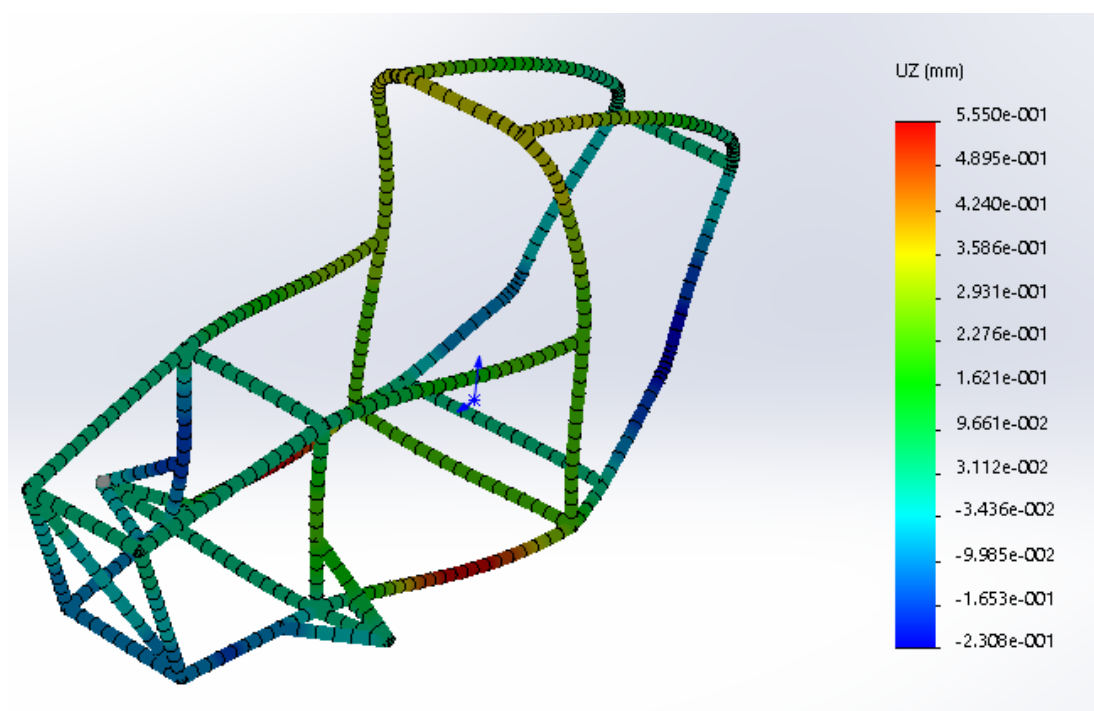


Figura 27. Desplaçaments en Y en l'assaig de corba simulant un gir a l'esquerra

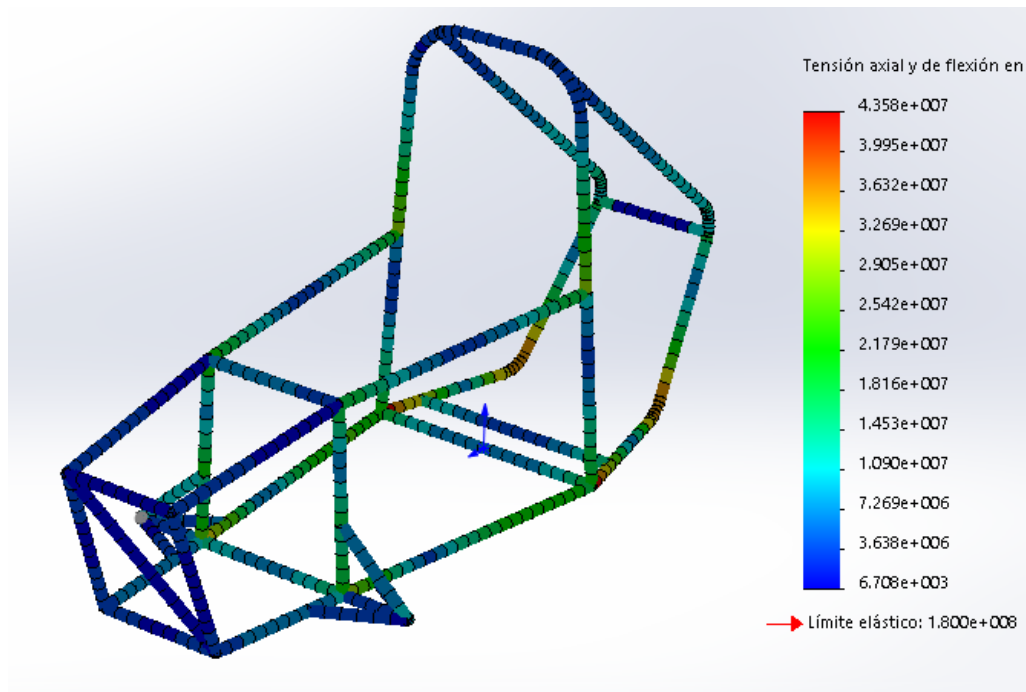


Figura 28. Distribució de tensions en l'assaig de pas per corba

Anàlisi de resultats

El desplaçament màxim obtingut és de 3.58 mm (figura 26), però amb aquest valor no es pot treure cap conclusió de l'anàlisi de corba, la major part d'aquesta deformació pot ser deguda al pes de cada component. Per comprovar-ho, s'ha graficat els desplaçaments en l'eix Z (figura 27) obtenint un valor màxim de 0.55 mm, molt poc significatiu.

En relació amb les tensions axials i les de flexió, s'observa una tensió màxima de 43.58 MPa, que resulta un factor de seguretat de 4.14, un valor molt alt com per preocupar-se.

Amb aquests resultats, es pot concloure que el xassís durant el gir no patirà danys estructurals ni es produirà cap punt crític. Doncs, no farà falta optimitzar el xassís pel que fa aquesta simulació.

4.12 Bolcada

En aquesta simulació es pretén analitzar les tensions i deformacions del vehicle en cas que aquest bolqui, ja sigui quedant de costat (gir 90°) o completament girat (180°).

La competició Electrocat inclou a la seva normativa un criteri simplificat per realitzar aquestes proves. Citant el reglament:

“El compartiment del pilot ha d'estar equipat amb un arc de seguretat que ha de ser capaç de suportar una càrrega de 700N aplicada en sentit vertical, horitzontal, o perpendicular sense deformar-se.”

S'entén que “sense deformar-se” es refereix a que no es superi el límit elàstic del material, ni que les deformacions siguin suficientment significatives com per posar en perill al pilot.

Tot i que la prova del reglament no representi un cas real de bolcada, és una bona simplificació que proveirà d'informació important sobre la rigidesa de l'arc de seguretat.

Es considera que la prova del reglament es realitzarà amb el vehicle parat, del dret i sense masses aplicades. No s'inclouen les masses en el estudi ja que en un cas de bolcada real, el vehicle quedarà tombat i possiblement les masses que abans s'hi aplicaven (pilot, components...) s'acabin recolzant sobre altres parts del xassís o sobre el terra.

Condicions de contorn

S'han fixat els punts d'ancatge de les rodes davanteres i els amortidors posteriors per simular un estat de parada estàtica del vehicle.

També s'han aplicat les condicions de contorn pròpies dels estudis de pista que s'han comentat a l'inici de l'apartat de simulacions.

Càrregues:

S'ha aplicat la força de 700N en la direcció requerida en cada cas repartida sobre la barra superior de l'arc. També s'ha considerat la força de la gravetat sobre el propi xassís.

Com en un cas de bolcada és complicat saber la posició exacte del cotxe i per tant la direcció en la que actua la gravetat, s'ha decidit no incloure els pesos del pilot i altres components, doncs el pes d'aquests pot actuar en direccions inusuals en cas de bolcada.

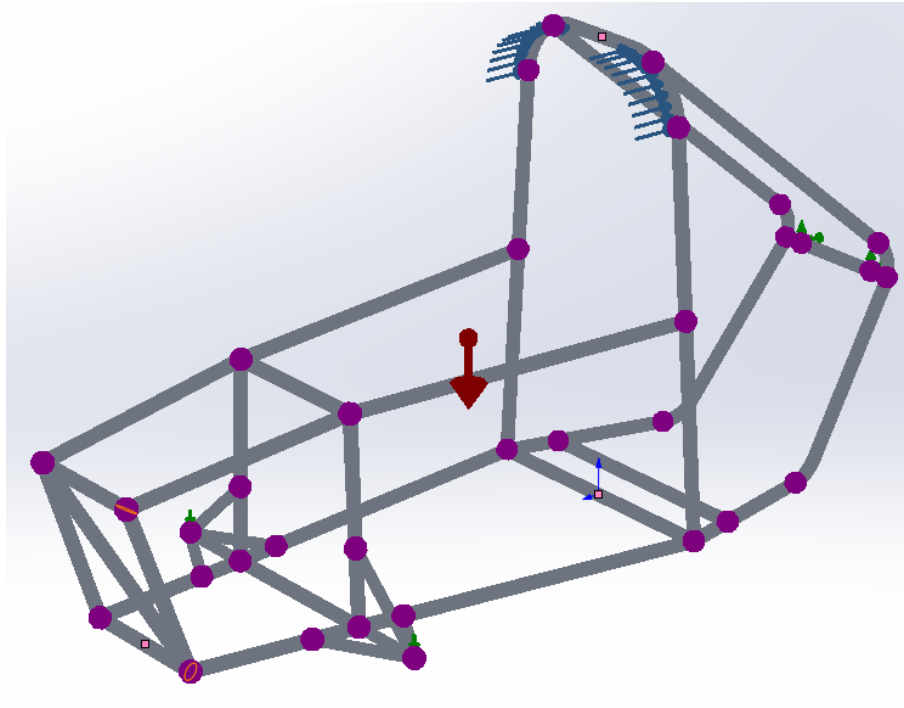


Figura 29. Condicions de contorn i forces aplicades en l'assaig de bolcada (Direcció força x negatiu)

Resultats

S'estudien els resultats de tensions màximes i desplaçaments màxims per els tres casos:

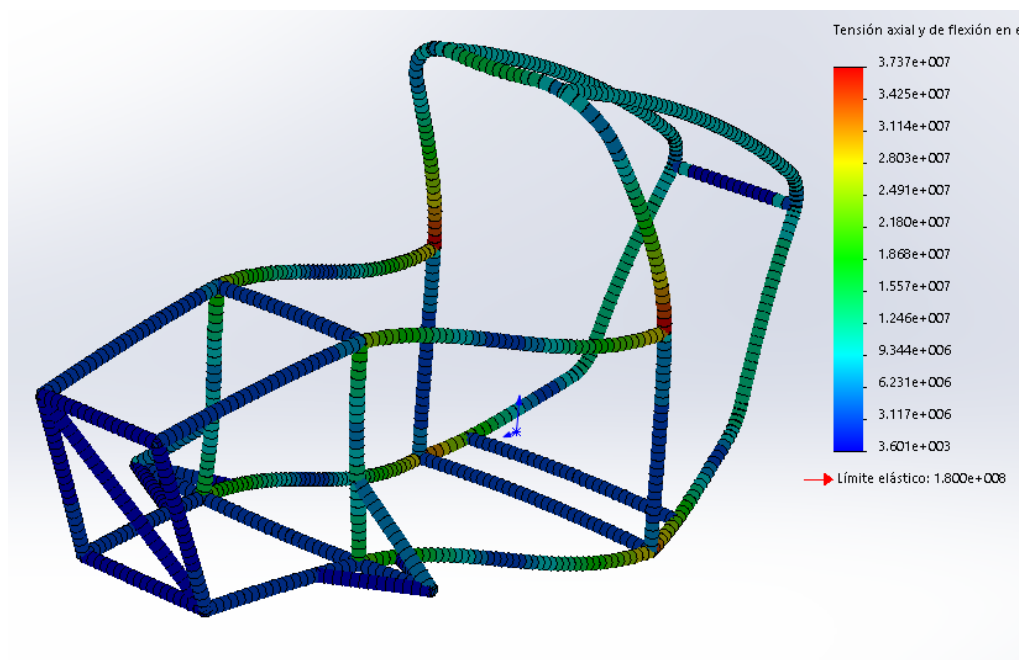
Força aplicada vertical (eix Y)

Figura 30. Distribució de tensions en l'assaig de bolcada - Força aplicada en Y

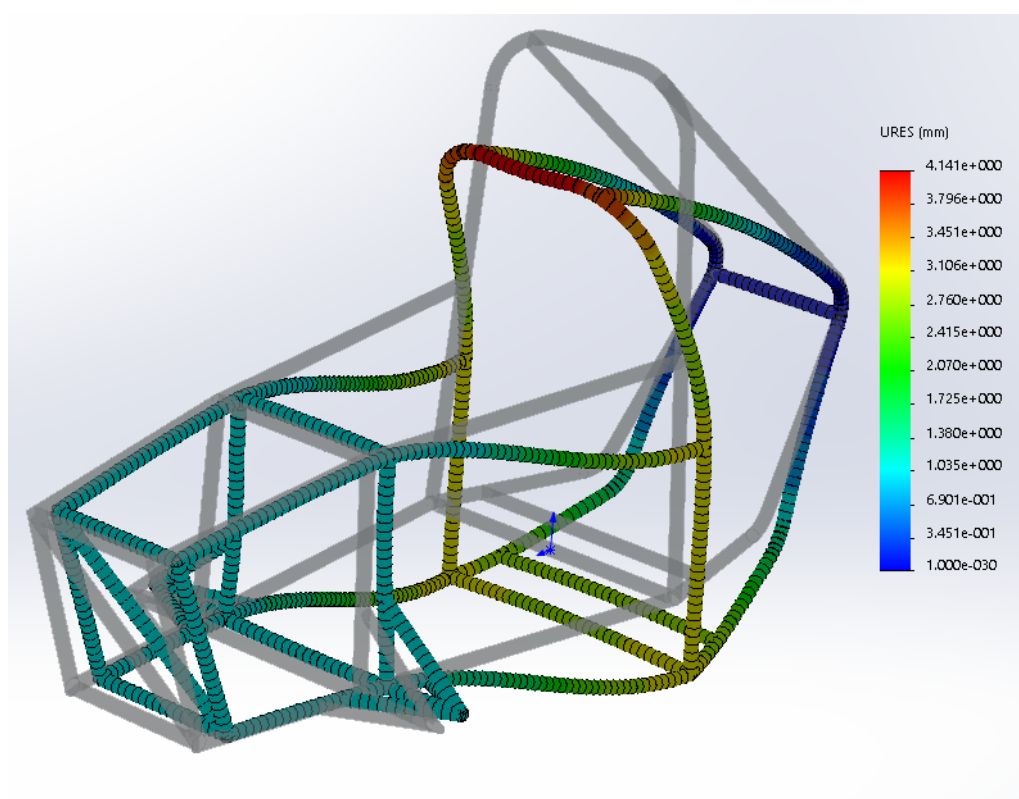


Figura 31. Desplaçaments totals en l'assaig de bolcada - Força aplicada en Y

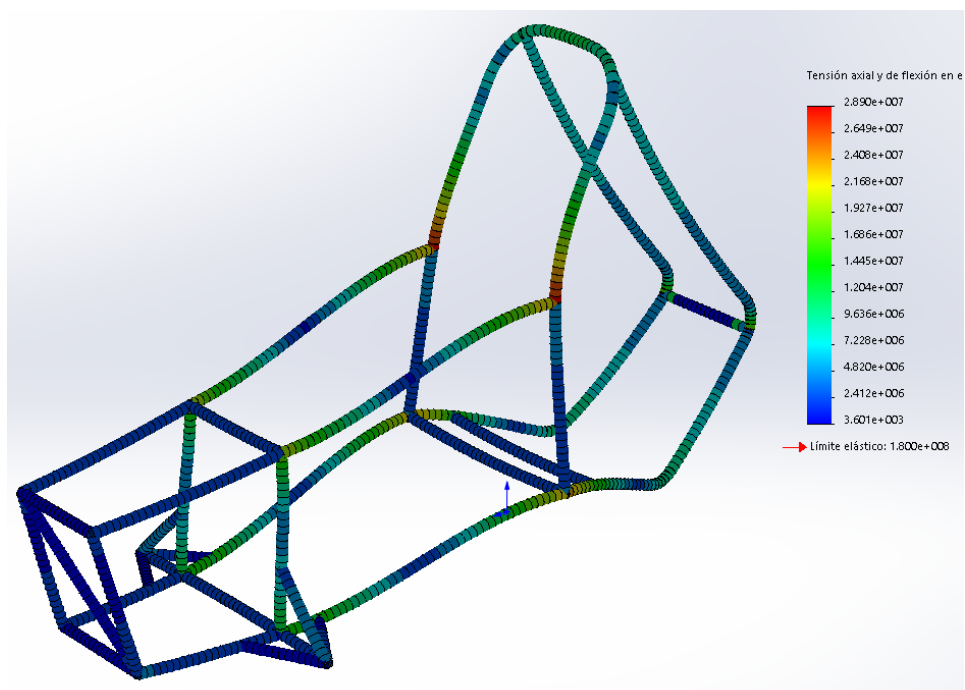
Força aplicada perpendicular (eix X negatiu)

Figura 32. Distribució de tensions en l'assaig de bolcada - Força aplicada en X negatiu

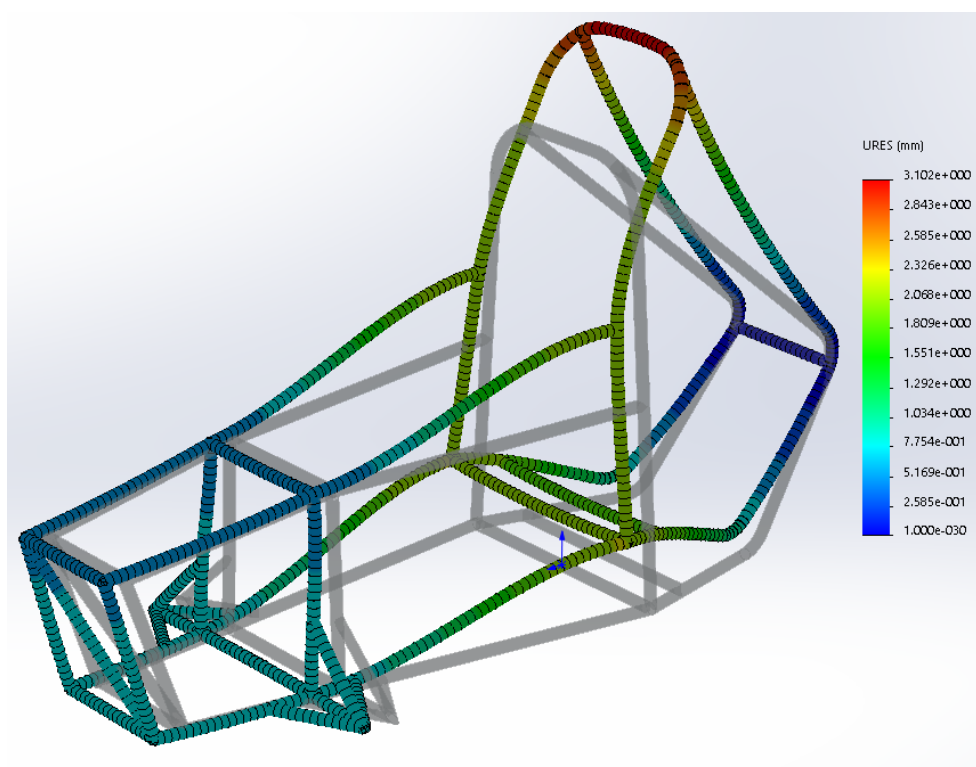


Figura 33. Desplaçaments totals en l'assaig de bolcada - Força aplicada en X negatiu

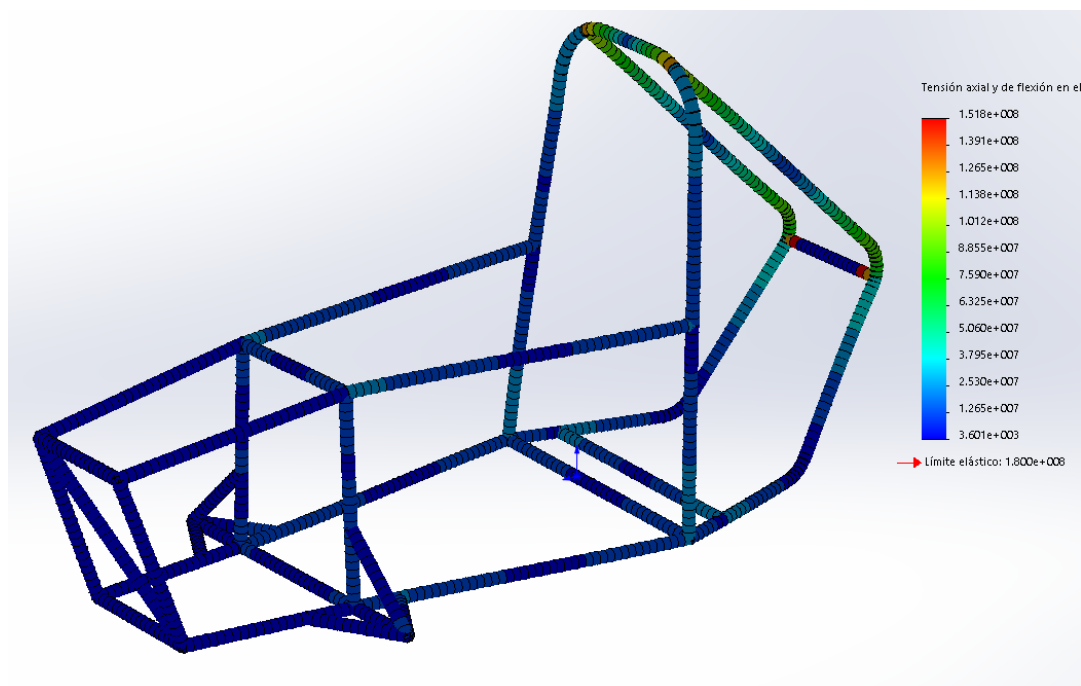
Força aplicada horitzontal (eix Z)

Figura 34. Distribució de tensions en l'assaig de bolcada - Força aplicada en Z

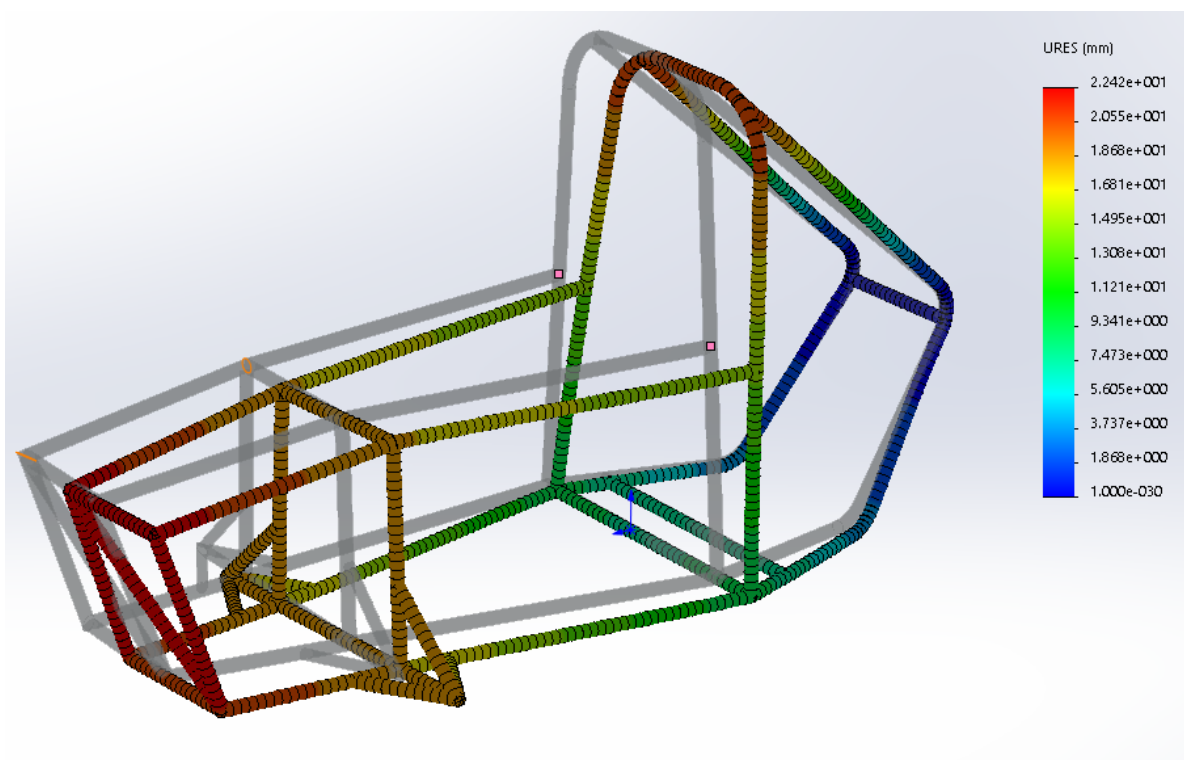


Figura 35. Desplaçaments totals en l'assaig de bolcada - Força aplicada en Z

Anàlisi de resultats:

En quant a l'estudi de tensions màximes, es pot observar en les figures anteriors que aquestes mai arriben a superar el límit elàstic del material, i per tant les deformacions patides no seran permanents.

Pel que fa als desplaçaments, aquests són sempre màxims en l'arc superior, on s'aplica la força, i en el pitjor dels casos són de 2.24 cm.

En vista a aquests resultats, podem confirmar que el xassís compleix els requeriments mínims de resistència a la bolcada exigides per Electrocat.

Tot i així, i tenint en compte que aquesta prova no és una simulació real de bolcada sinó una simplificació imposada per la competició, és preocupant que les tensions màximes en el cas de força horitzontal (eix z) siguin properes a les del límit elàstic. Això pot ser un indicador que una bolcada lateral (90°) podria provocar una fallida elàstica en el xassís que posaria en perill al pilot. Per millorar això i fer el vehicle més segur, en la optimització del xassís es fixarà com un dels objectius reforçar la rigidesa de l'arc de seguretat.

5. Optimització

5.1 Criteris de disseny:

Un cop fetes les simulacions, s'utilitzarà la informació obtinguda per optimitzar la estructura del xassís. A continuació, s'explicaran quins són els criteris més importants a l'hora de millorar la estructura existent, que són la rigidesa, el pes, i el cost.

Aquests tres paràmetres estan íntimament relacionats, doncs generalment un increment en la rigidesa del xassís implica un increment en la massa i en el preu d'aquest.

És per això que la optimització seguirà un procés iteratiu de millora, on després de cada iteració s'avaluarà cada un dels paràmetres i es procedirà en funció dels valors obtinguts.

5.1.1 Cost:

Al tractar-se d'una competició de caire amateur, el cost esdevé un paràmetre a tenir molt en compte al realitzar canvis al xassís. S'intentarà que el cost de fabricació del xassís optimitzat sigui similar al del xassís actual. És per això que s'han imposat una sèrie de restriccions associades amb el preu que es tindran en compte al optimitzar:

Material:

Les barres disponibles per l'equip seran les mateixes que el 2018

- Material: Alumini EN-AW 3003
- Perfil: circular 25x0,2mm o 30x0,2m

L'alumini és un material àmpliament disponible, té un preu assequible i presenta una molt bona relació entre propietats mecàniques i densitat. Tenint en compte que els motors proveïts per l'Electrocat tenen una potència molt limitada i que els vehicles rarament sobrepassen els 50km/h, no hi ha la necessitat de buscar un altre material amb millors propietats mecàniques (com ara l'acer), ja que aquests augmentarien significativament el pes del cotxe, i la rigidesa de la estructura quedaria sobredimensionada.

A més a més, l'equip ja disposa de l'equipament necessari per realitzar soldadures amb alumini.

Amortidors:

L'equip no disposa d'amortidors per les rodes davanteres. Es recomana a l'equip que de cara a la competició del 2019 intenti aconseguir-ne, doncs millorarien considerablement el comportament dinàmic del vehicle.

Es dissenyarà i simularà el nou xassís suposant que només hi hauran amortidors a la part posterior. Tot i així, es deixarà un espai disponible per afegir les barres necessàries per crear la estructura de suport als amortidors davanters per si l'equip decideix afegir-los de cara a l'any vinent.

5.1.2 Rigidesa

Torsió

En vista els resultats obtinguts en les simulacions de torsió del xassís actual, el paràmetre més important optimitzar en el nou xassís és la rigidesa a la torsió.

Com ja s'ha comentat anteriorment, la rigidesa a la torsió és un paràmetre especialment crític en tot xassís automobilístic, ja que està íntimament relacionada amb el comportament dinàmic en corba del vehicle i amb la seva distribució de carregues. Una major rigidesa a la torsió implica menys deformacions del xassís, evitant així comportaments no desitjats i problemes en la dinàmica. A més, minimitzar la deformació del eix davanter de les rodes és especialment important en aquest vehicle en particular, ja que no disposa d'amortidors davanters.

També cal tenir en compte que en les proves de la competició Electrocat els vehicles han de superar proves de *eslalom* amb cons, i competir en un circuit de carrera amb moltes corbes tancades. És en aquestes proves on el comportament en corba del vehicle és clau per obtenir millor resultats.

És degut a aquests motius, i tenint en compte la rigidesa a torsió excepcionalment baixa que s'ha determinat en el xassís en les simulacions anteriors, que s'ha escollit la rigidesa a torsió com a paràmetre crític en el procés d'optimització.

5.1.3 Pes

La massa del xassís és, juntament amb la rigidesa, el criteri que més afecta al funcionament del cotxe a la pista, ja que com més lleuger sigui el vehicle. Com ja s'ha comentat anteriorment, hi ha una relació entre la rigidesa del xassís i el pes d'aquest. S'ha decidit que la rigidesa serà el criteri més important al optimitzar el xassís, per tant el pes d'aquest haurà d'actuar com un limitant.

També cal considerar que, tot i que disminuir el pes sigui de vital importància per obtenir millors resultats a les proves, el pes del xassís representa un percentatge poc significatiu del pes total. En el vehicle de 2018, que tenia un pes total d'aproximadament 120kg, el xassís pesava 8,17kg. En aquest cas, el pes del xassís representa un 6,81% del pes total. Cal tenir aquestes dades presents perquè en el procés d'optimització el pes de xassís pot variar significativament, però això només suposarà una petita variació del pes total.

5.1.4 Seguretat:

Garantir la seguretat del pilot ha de ser un dels principals objectius a l'hora de dissenyar qualsevol tipus de vehicle, tot i que en molts casos això impliqui un augment del pes del xassís. Fets els estudis d'impacte frontal i bolcada del xassís i extretes les pertinents conclusions, els objectius que s'han fixat en el procés d'optimització per millorar la seguretat del pilot són:

Minimitzar danys en cas d'impacte frontal:

El xassís original té poques barres de reforç a la part davantera, fet que pot generar concentracions de tensions en cas d'impacte. És per això que s'ha decidit introduir una estructura amb més barres. Encara que tinguin un diàmetre una mica menor, serà més resistent i es podrien millorar molt els resultats de les proves d'impacte frontal, doncs s'aconseguiria una distribució de forces més uniforme.

A més, un altre punt feble que s'ha trobat als anàlisi és el punt d'unió entre l'arc central/de seguretat i les barres laterals del pilot. Doncs, es reforçarà aquest arc amb una barra que uneixi aquest punt crític amb la part posterior del xassís. Així s'evitarà que les barres que estan al voltant del pilot es deformin ho menys possible.

Minimitzar danys en cas d'impacte lateral:

Rebre un impacte lateral és molt menys comú que un frontal en una competició d'aquest tipus, però tot i així s'intentarà millorar el disseny existent incloent barres triangulades als lateral que actuïn de barrera entre el pilot i l'exterior.

Minimitzar danys en cas de bolcada:

Estudiant els resultats obtinguts a la simulació de bolcada, s'ha determinat que tot i que l'arc principal de seguretat passa les proves imposades per la normativa de la competició, aquest podria fallar per concentracions excessives de tensions en cas de bolcada lateral (90°).

De cara a la optimització es reforçarà la estructura de l'arc de seguretat per disminuir el risc de que el pilot prengui mal en cas de bolcada.

A més a més, s'afegirà un arc frontal, situat davant del volant, que oferirà major protecció en cas que el vehicle bolqui.

5.1.5 Centre de masses:

El centre de masses juga un paper fonamental en el comportament del vehicle sobre la pista. Un centre de masses baix evita balancejos dels amortidors i atorga un millor comportament en global del monoplaça. El xassís és un component important per situar el centre de masses,

tant per la seva pròpia distribució de masses com pel fet que és on es situen les masses més importants del vehicle, que són el pilot i el paquet motor/bateria/variador.

Com ja s'ha comentat anteriorment, el xassís està fabricat amb alumini. És per això que la seva massa representa només el 6,81% del pes total del vehicle, i per tant la distribució de masses del xassís per si sol influirà poc en la posició del centre de masses del vehicle.

El 93,19% de masses restant corresponen al pilot i al paquet motor/bateria/variador, i és la posició d'aquests el que més farà variar el centre de masses.

Per al disseny del nou xassís s'ha decidit actuar de manera conservadora i no variar la posició d'aquests components en excés. Tot i així, es recomana a l'equip que de cara al vehicle del 2019 intenti situar el conjunt motor/bateria/variador més baix que al xassís actual, doncs així s'aconseguiria baixar l'alçada del centre de masses significativament.

5.1.6 Espai de la cabina:

L'espai de la cabina del pilot ha de ser suficient com perquè una persona d'aproximadament 1,70m d'alçada pugui conduir el vehicle còmodament.

És important no sobredimensionar aquest espai, doncs una cabina més espaiosa faria que el vehicle fos més gran i pesat.



Figura 36. Components de l'equip CREVE amb el xassís de l'any 2018

Com es pot apreciar a la figura anterior, el xassís del 2018 aconsegueix encabir un pilot sense estar sobredimensionat en excés. La zona que queda més desaprofitada és a part davantera de la cabina queda desaprofitada, com es veu a la figura 36 i 37.

Fetes aquestes observacions s'ha decidit incrementar lleugerament la llargada de la cabina del nou xassís perquè el pilot hi càpiga més còmodament. A més a més es donarà una forma més arrodonida al frontal de la cabina de tal manera que no existeixi l'espai desaprofitat vist

anteriorment. A més a més, una part frontal arrodonida afavorirà la aerodinàmica del vehicle, tot i que es desconeix si l'impacte que tindrà serà significatiu. En una competició com l'Electrocat, on la velocitat dels vehicles és baixa, la aerodinàmica del vehicle té un paper més secundari i els equips no donen gaire importància a aquest aspecte en fer els dissenys.

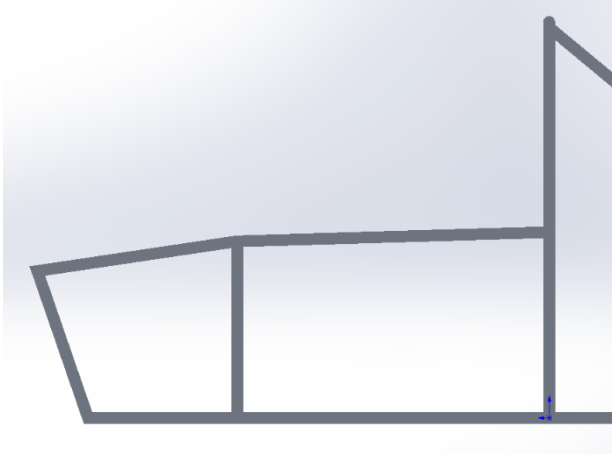


Figura 37. Part frontal xassís 2018

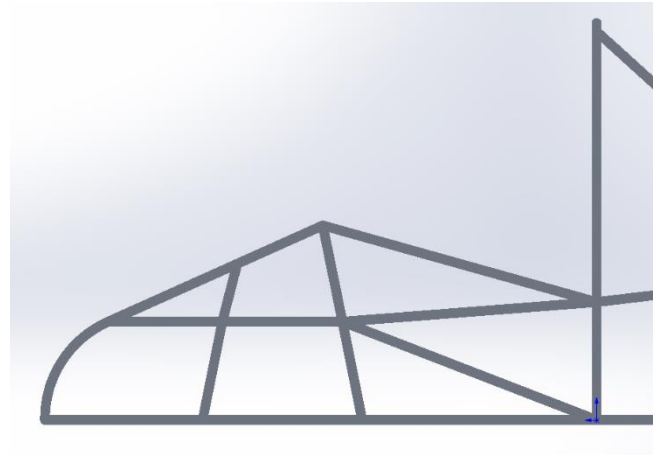


Figura 38. Part frontal xassís optimitzat

5.2 Variables a modificar per millorar el disseny:

Existeixen diversos mètodes per implementar millores estructurals en el disseny del xassís.

A continuació es discutiran alguns d'aquests mètodes:

- Modificar perfil de biga: Utilitzar bigues de diferent perfil al actual sens dubte tindria un impacte important en el comportament del nou xassís. Però tal i com s'ha comentat a l'apartat de costos de criteris de disseny, una de les restriccions que s'ha imposat al disseny del nou xassís és que ha d'estar fabricat amb les bigues que l'equip tenia disponibles el 2018. Per tant, els dos únics perfils de biga disponibles seran el de 25x2mm i el de 30x2mm.
- Modificar material: Les propietats del material utilitzat en el xassís (mòdul de Young, límit elàstic, densitat,...) juguen un paper molt important al dissenyar el xassís, doncs les propietats mecàniques de les barres utilitzades dependrà d'aquestes característiques del material. Però pel mateix motiu comentat anteriorment, s'ha imposat que les barres que s'utilitzaran en el nou xassís seran iguals que les del xassís del 2018, i per tant seran d'alumini.
- Modificar geometria: Aquest mètode consisteix en implementar canvis en el xassís modificant la disposició i la longitud de les barres que el conformen. Existeixen disposicions de barres que atorguen major rigidesa i millors propietats estructurals que d'altres.

Un exemple d'implementació de millores en el xassís per canvis en la geometria és la triangulació de barres. Triangular una estructura de quatre costats consisteix en afegir una barra de reforç que connecti dos vèrtex oposats de la estructura (figura 39). Això atorga al conjunt de bigues una resistència a la deformació molt major que la estructura sense triangular, i ajuda a distribuir més equitativament les tensions que es concentren en els vèrtex de la estructura.

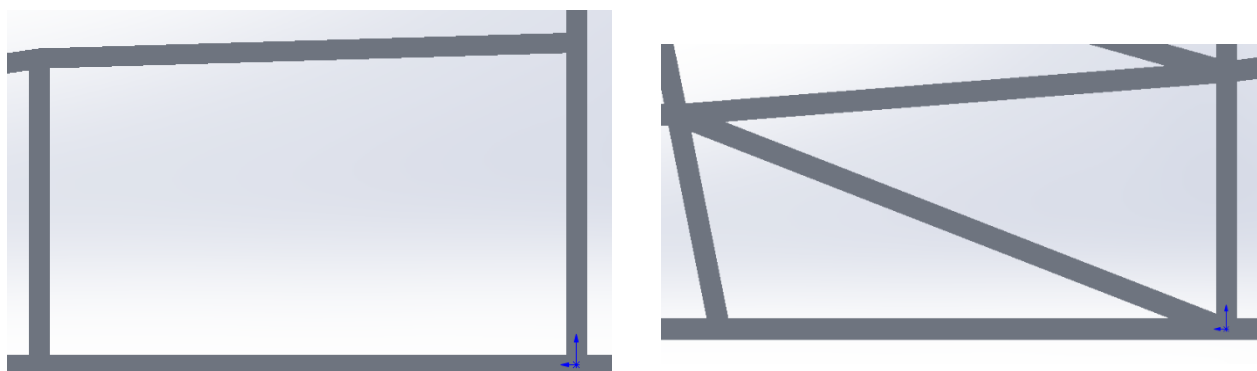


Figura 39. Comparació de l'abans i el després de la triangulació

Tenint en compte que el xassís original tenia molt pocs conjunts de bigues triangulats, aquest pot ser un bon mètode per aconseguir millores significatives en el nou disseny. L'únic desavantatge real d'aquest mètode és que implica utilitzar més barres de les que s'utilitzarien si no es triangules la estructura, i per tant incrementa el pes del vehicle.

5.3 Similituds entre els dos xassís.

Aquest treball té la intenció d'implementar canvis i millores en el xassís del 2018 per aconseguir un millor disseny per el 2019, i no es pretén dissenyar una estructura completament nova des de zero. És per això que s'ha decidit mantenir diversos trets característics de la estructura original en el nou disseny. A continuació es descriuen algunes d'aquestes característiques i mesures comuns en ambdós models:

- El tren posterior de rodes serà de mides similars al que s'ha utilitzat en el xassís 2018. Per tant, els ancoratges dels amortidors posteriors estan a la mateixa distància del terra i del arc de seguretat que en el original.
- Les rodes davanteres no tenen amortidors
- El material utilitzat és l'alumini
- S'han utilitzat únicament els dos perfils de barra emprats en el xassís original (25x2 i 30x2)
- S'han intentat mantenir, dins el possible, les dimensions generals del xassís (amplada, llargada, distància entre eixos...)
- S'ha intentat mantenir la distribució de masses original, dins el possible.

6. Optimització iterativa i disseny final

A continuació es farà un recull d'algunes de les versions intermèdies per il·lustrar el mètode de millora iterativa que s'ha seguit durant la optimització, i es comentaran i justificaran els canvis fets en cada una d'elles.

El criteri que s'ha seguit per veure la viabilitat d'un canvi és fer una comparativa dels dos paràmetres més crítics del xassís abans i després del canvi, essent aquests paràmetres la rigidesa a la torsió i el pes. Feta la comparativa del xassís abans i després del canvi introduït es valora si els resultats obtinguts justifiquen introduir el canvi o no.

La rigidesa a torsió de cada iteració s'ha calculat exactament igual que a les simulacions del xassís del 2018, utilitzant també un parell torsor de 1000N·m.

Per no allargar en excés aquesta memòria s'ha decidit no incloure les iteracions amb canvis poc significatius.

6.1 Primera iteració: V1

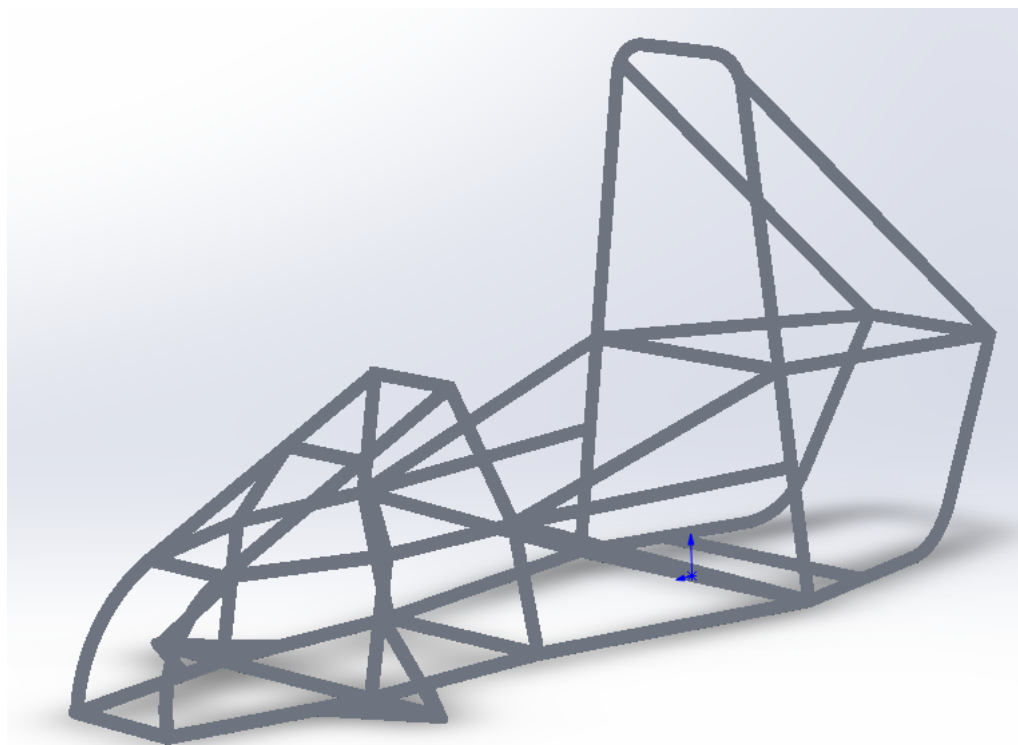


Figura 40. Primera versió del xassís optimitzat

Aquesta primera versió s'ha centrat en modificar la part davantera del xassís, introduint els canvis comentats anteriorment a la cabina del pilot (allargar-la i arrodonir la part davantera) i afegint l'arc de seguretat addicional davant del volant. S'han inclòs barres noves per reforçar

estructures intentant triangular-les sempre que fos possible. En vista el gran nombre de barres que el nou xassís requereix, s'ha decidit fer tota la estructura amb barres de perfil 25x2mm en comptes de les 30x2mm del xassís original. Això permetrà afegir més barres per tenir més control sobre la distribució de tensions, aconseguint uns resultats més uniformes al llarg del xassís sense incrementar dramàticament el pes.

També s'han implementat canvis en la forma de la cabina del pilot, que ha passat de ser quadrada a hexagonal, ja que aquesta segona estructura absorbeix millor els esforços a torsió.

S'han afegit també barres laterals a la cabina del pilot per oferir més protecció en cas d'impacte lateral, i s'ha baixat la altura de les barres laterals existents per facilitar la evacuació del pilot en cas d'accident i baixar el centre de masses del xassís.

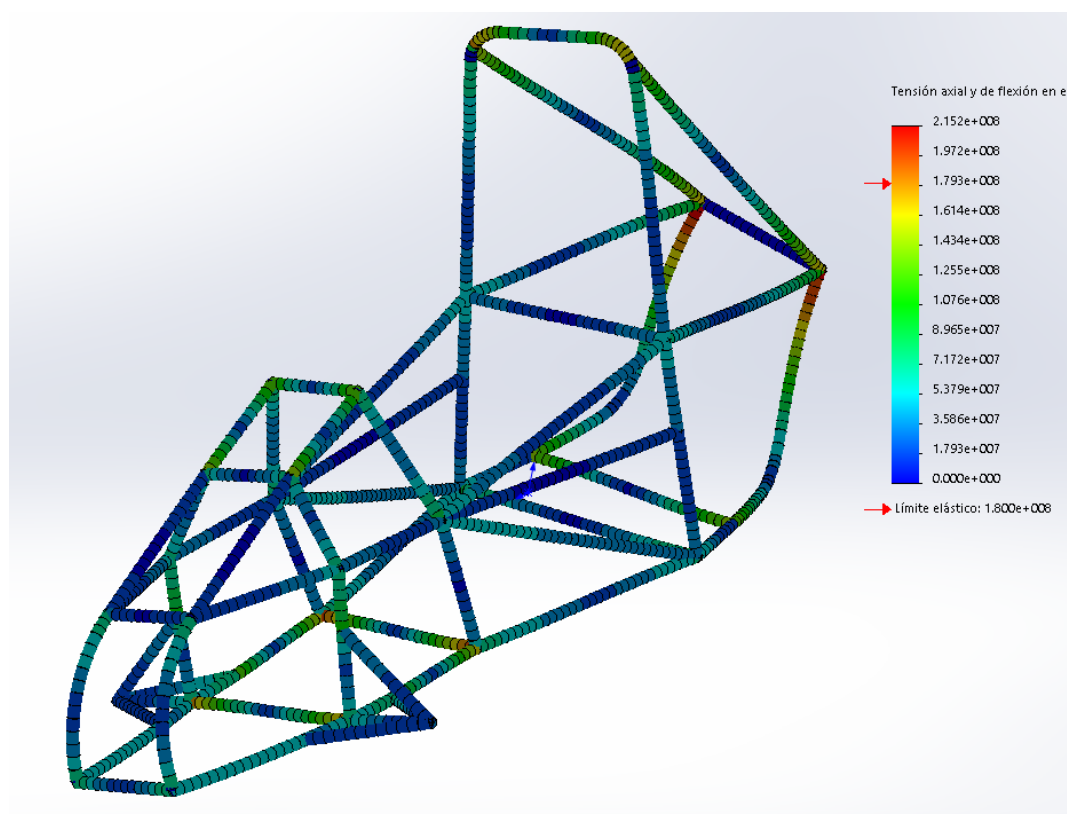


Figura 41. Distribució de tensions de la primera versió optimitzada

	Xassís 2018	Xassís V1	Variació
Pes	8,17 kg	9,29 kg	+13,71%
Ktors	153,16 N·m/º	161,72 N·m/º	+5,59%

Com es pot apreciar en la taula anterior, l'increment que s'ha aconseguit en la rigidesa torsional és molt petit comparant amb l'augment en el pes. Aquest és un primer model base, de manera que és normal que els canvis obtinguts no siguin els desitjats encara.

6.2 Segona iteració: V2

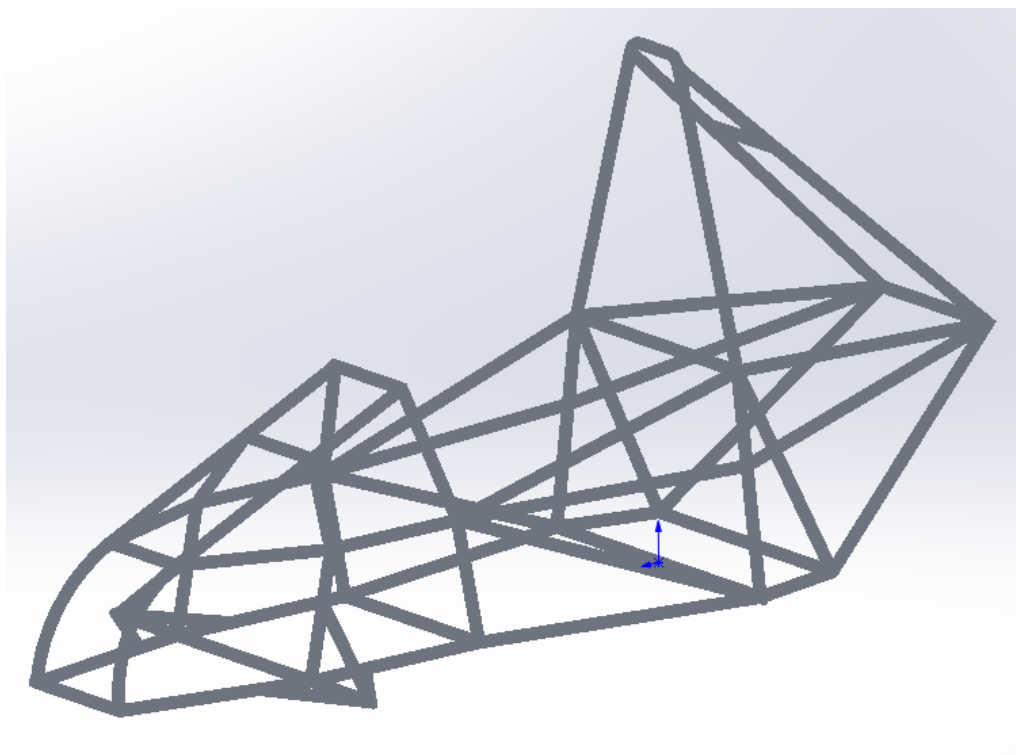


Figura 42. Segona versió del xassís optimitzat

Respecte la primera versió, els canvis s'han centrat en la part posterior del vehicle, ja que en la simulació a torsió de la versió anterior s'han observat moltes concentracions de tensions en aquesta zona.

S'ha optat per un enfocament conservador i s'han inclòs més barres de reforç del que segurament sigui òptim en la relació rigidesa-pes. Si és necessari conservar-les o no s'estudiarà en futures iteracions.

També s'ha reduït l'amplada i alçada de l'arc de seguretat per disminuir el pes, assegurant que en tot moment cobreixi el pilot i tenint en compte els requeriments de la normativa de l'Electrocat.

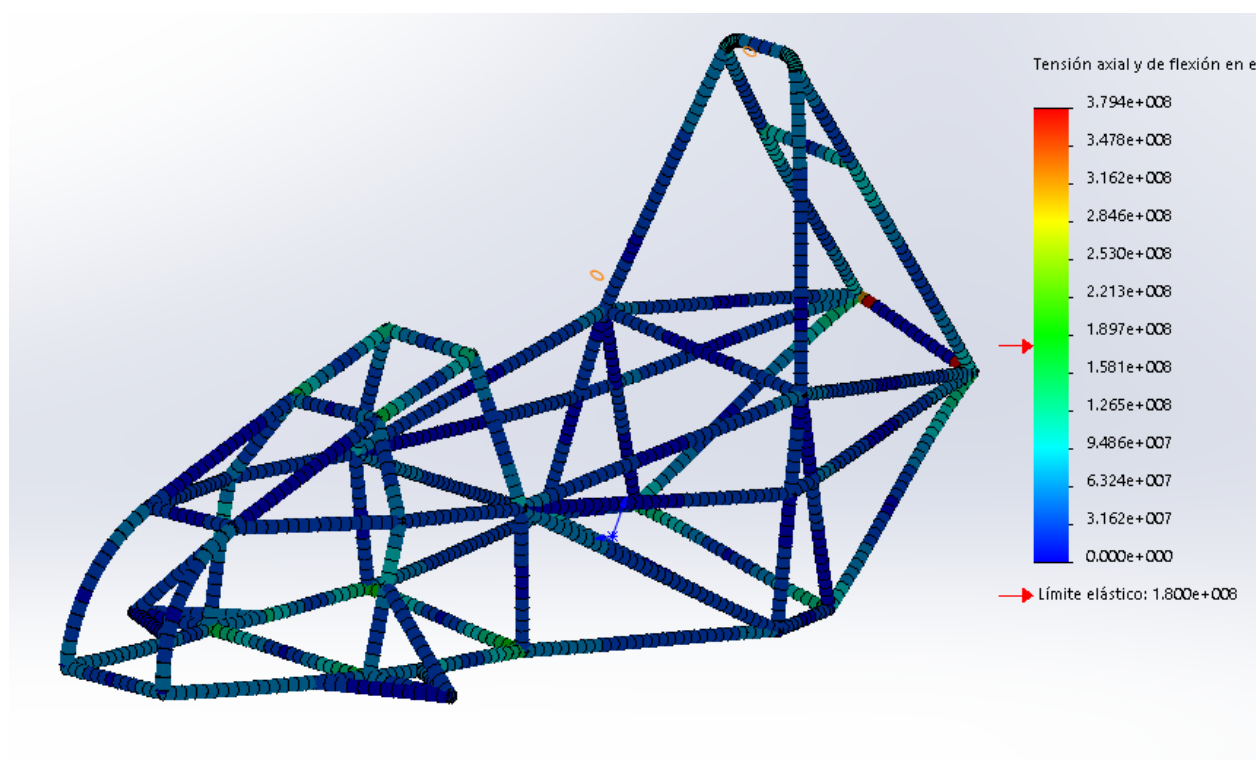


Figura 43. Distribució de tensions de la segona versió optimitzada

	Xassís 2018	Xassís V2	Variació
Pes	8,17 kg	10,12 kg	+23,86%
Ktors	153,16 N·m/°	232,34 N·m/°	+51,17%

Tot i l'increment significatiu de pes, comencen a apreciar-se millores en la rigidesa a torsió del vehicle. Es continua amb el procés d'optimització.

6.3 Vuitena iteració: V8

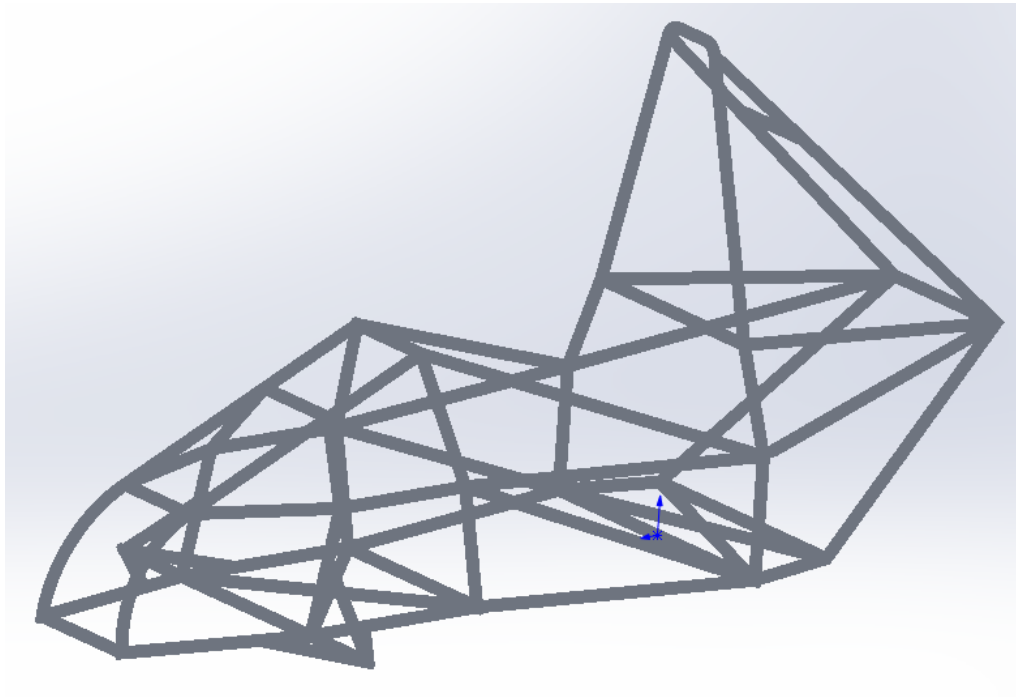


Figura 44. Vuitena versió del xassís optimitzat

En aquesta iteració es canvia la orientació de les barres laterals de la cabina del pilot perquè ajudin a absorbir les concentracions de tensions generades al arc de seguretat del volant. Re-orientant aquestes barres també es facilita la entrada i sortida del pilot al vehicle. També s'han eliminat barres de la part posterior que al analitzar-les en estudis de tensions s'ha determinat que estaven absorbint poca càrrega de tensions, i que l'augment de pes que suposava incloure-les no compensava l'augment en la rigidesa estructural.

També s'han afegit barres creuades a dues zones de la base on es concentraven tensions per ajudar a distribuir-les millor i s'ha canviat la forma de la base de l'arc principal de seguretat per una forma més hexagonal que concordes amb la forma de la cabina del pilot.

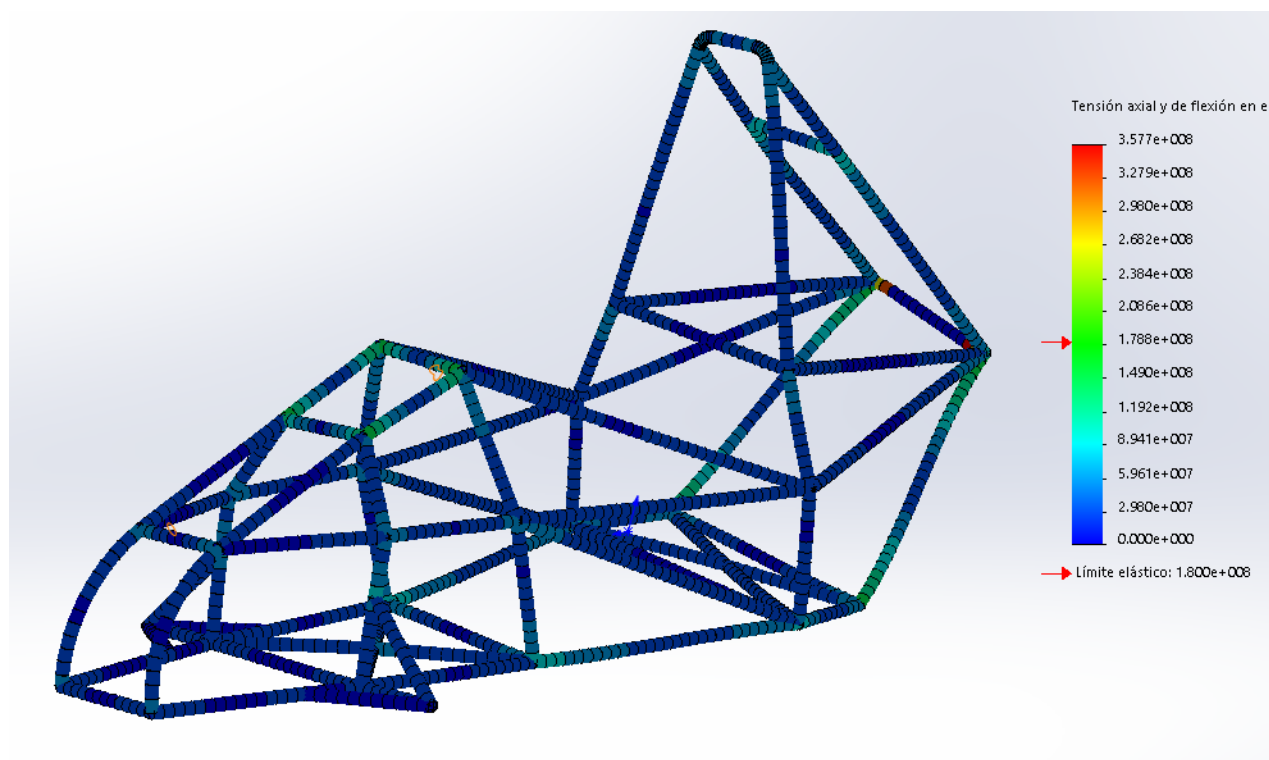


Figura 45. Distribució de tensions de la vuitena versió optimitzada

	Xassís 2018	Xassís V8	Variació
Pes	8,17 kg	10,68 kg	+30,72%
Ktors	153,16 N·m/º	388,05 N·m/º	+153,36%

S'observa una gran millora de la rigidesa a torsió amb cada iteració, a costa de petits increments en el pes. Tot i que els resultats són satisfactoris, es continua amb el procés d'iteració per intentar trobar els millors resultats possibles.

6.4 Tretzena iteració: V13

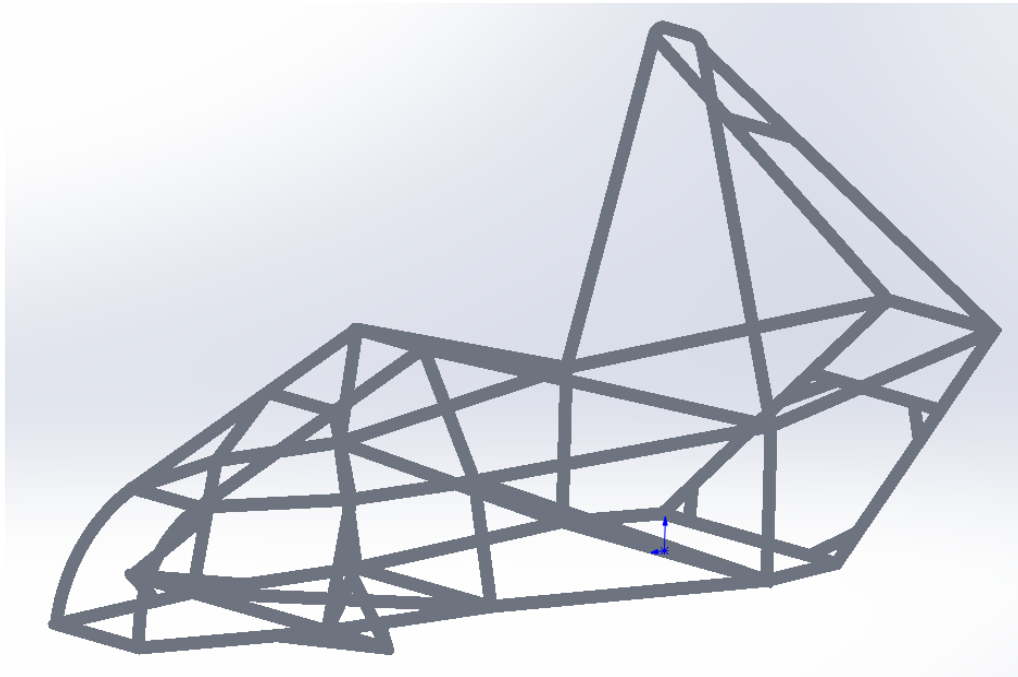


Figura 46. Tretzena versió del xassís optimitzat

En aquesta iteració s'han eliminat més barres de la part posterior que no tenen un gran impacte en la distribució de tensions, s'ha tornat a canviar la forma de l'arc de seguretat i s'han afegit nervis a punts d'altres concentracions de tensions a la part posterior.

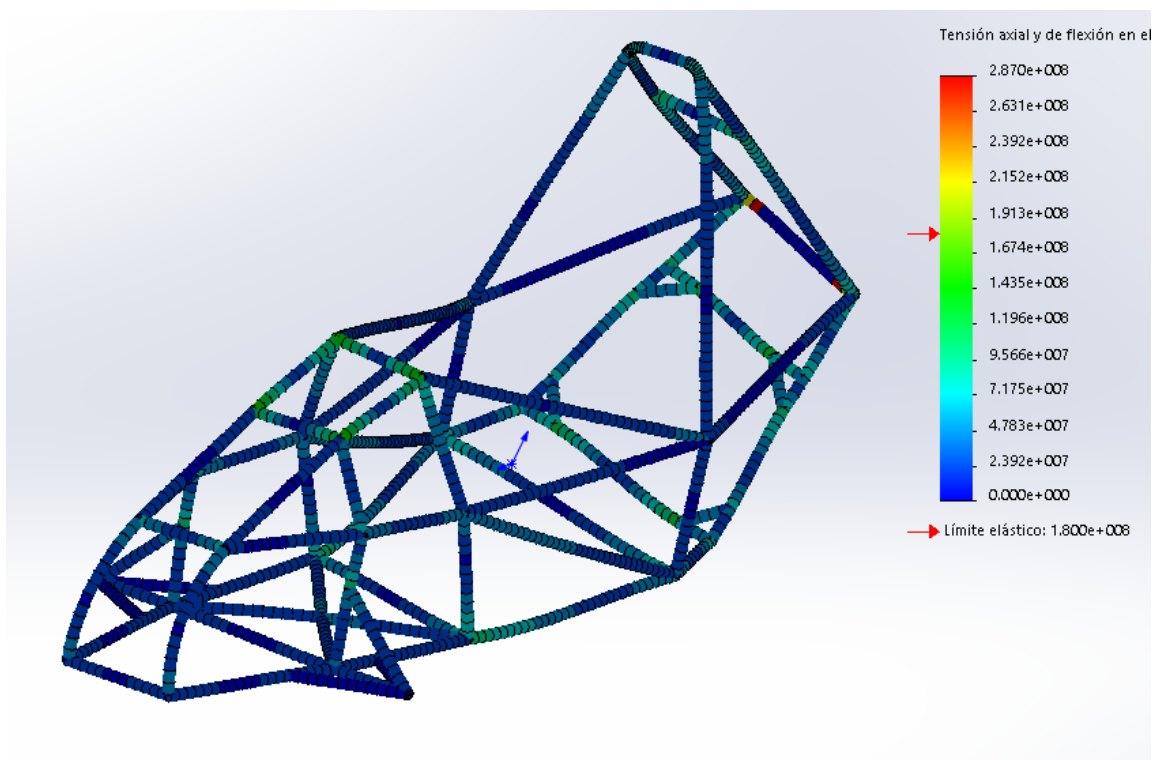


Figura 47. Distribució de tensions de la tretzena versió optimitzada

	Xassís 2018	Xassís V13	Variació
Pes	8,17 kg	9,86 kg	+20,69%
Ktors	153,16 N·m/º	475,03 N·m/º	+210,15%

Estudiant les últimes iteracions, s'estan aconseguint cada vegada increments de rigidesa a la torsió més petits, cosa que ens fa pensar que el xassís s'aproxima a un punt òptim de relació rigidesa - pes.

La rigidesa a la torsió, tot i que està allunyada al valor objectiu de 1000 N·m/º que s'havia proposat inicialment, ja té un valor més raonable (475,03 N·m/º) que es podria donar per vàlid en alguns sectors de la indústria de vehicles de competicions a baixes velocitats, com ara en el món del karting.

Com ja s'ha comentat anteriorment, un increment d'un 20,69% en el pes pot semblar important, però cal recordar que el xassís representa un petit percentatge del pes total del vehicle. Aquest increment del 20,69% del pes del xassís suposa que el pes del vehicle passi de 128,17 a 129,86 kg, és a dir, que incrementi en un 1,31%.

Tenint en compte la lleugeresa del xassís i el percentatge que representa del pes global, s'ha simulat també aquest mateix model utilitzant barres de 30x2mm en comptes de les 25x2mm, i els resultats obtinguts són els següents:

	Xassís 2018	Xassís V13 (30x2mm)	Variació
Pes	8,17 kg	11,90 kg	+45,65%
Ktors	153,16 N·m/º	761,35 N·m/º	+397,09%

Com es pot apreciar, la millora en la rigidesa és evident. Tot i així, s'ha decidit seguir una línia conservadora i utilitzar les barres de 25x2mm per mantenir el pes del xassís similar al del any passat.

Es deixa en mans del equip decidir si en futures edicions utilitzaran un xassís més pesat però més rígid a torsió, com és el presentat anteriorment amb barres de 30x2mm.

En definitiva, en vista dels bons resultats obtinguts amb la versió 13 del xassís es decideix utilitzar aquesta nova versió provisionalment. Si al realitzar les altres simulacions en pista amb aquest model s'obtenen resultats satisfactoris, es presentarà definitivament aquesta versió com a proposta per a l'any 2019.

7. Xassís 2019

Al igual que el xassís del 2018, el nou xassís té un disseny tubular creat a partir de barres d'alumini de perfil circular buides per dins soldades entre elles. A diferència del model de l'any anterior, tot el xassís està format per barres de perfil 25x2mm. A la figures 48, 49, 50 i 51 es poden apreciar diverses vistes del modelat 3D d'aquest xassís.

A continuació, tal i com s'ha fet anteriorment amb el xassís del 2018, es tornaran a definir les característiques d'aquest xassís, les seves parts, i s'establiran analogies entre el nou model i l'antic per poder replicar les simulacions fetes amb el model del 2018 en el nou model sense haver de canviar les condicions de les simulacions. D'aquesta manera, si les condicions de les simulacions són les mateixes, es podrà extreure més informació de les comparacions dels resultats obtinguts entre les simulacions antigues i les noves.

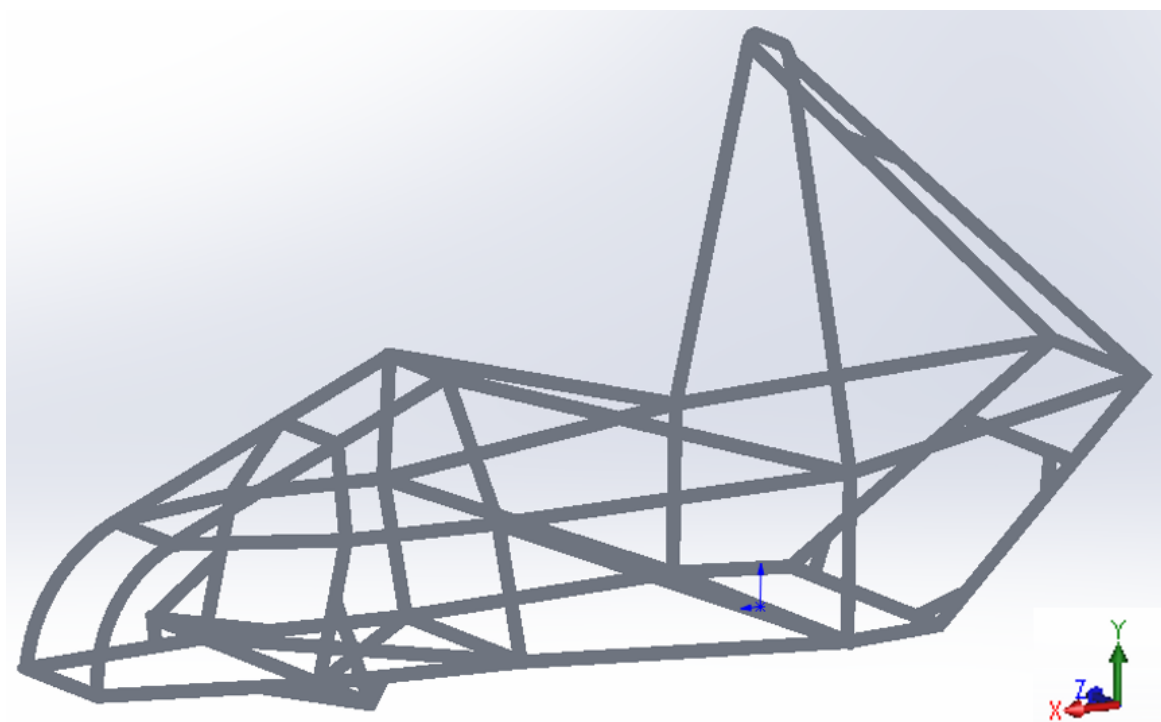


Figura 48. Nou model de xassís després de tot el procés d'optimització

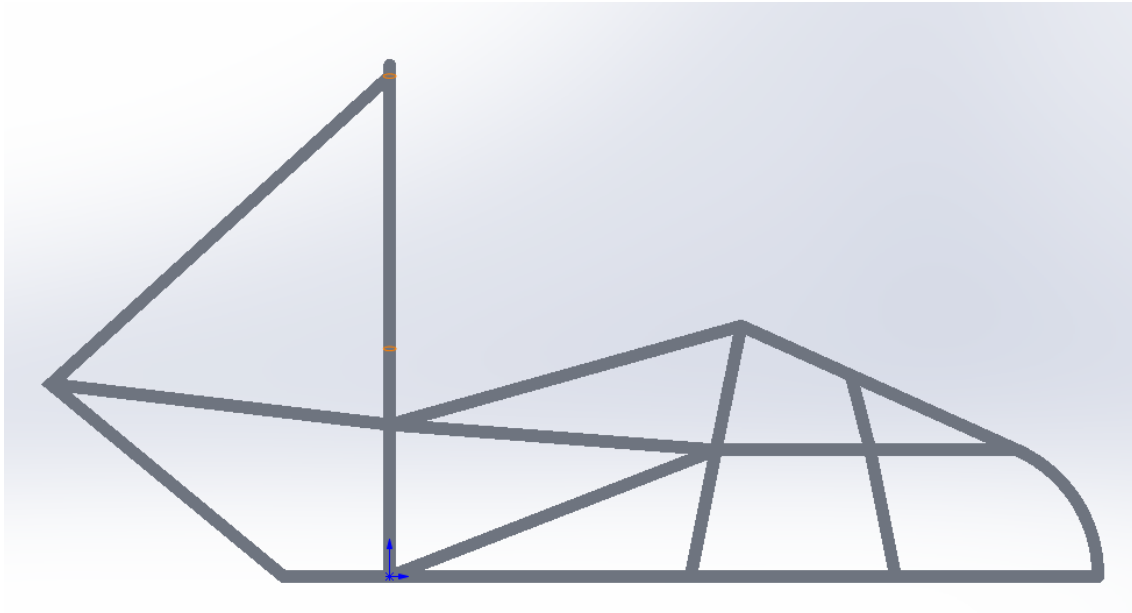


Figura 49. Vista lateral del nou xassís

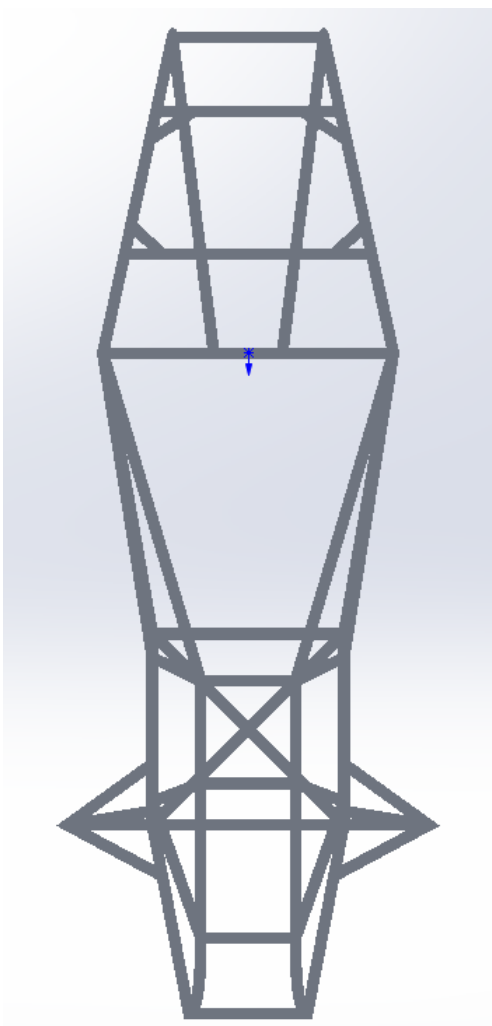


Figura 51. Vista superior del nou xassís

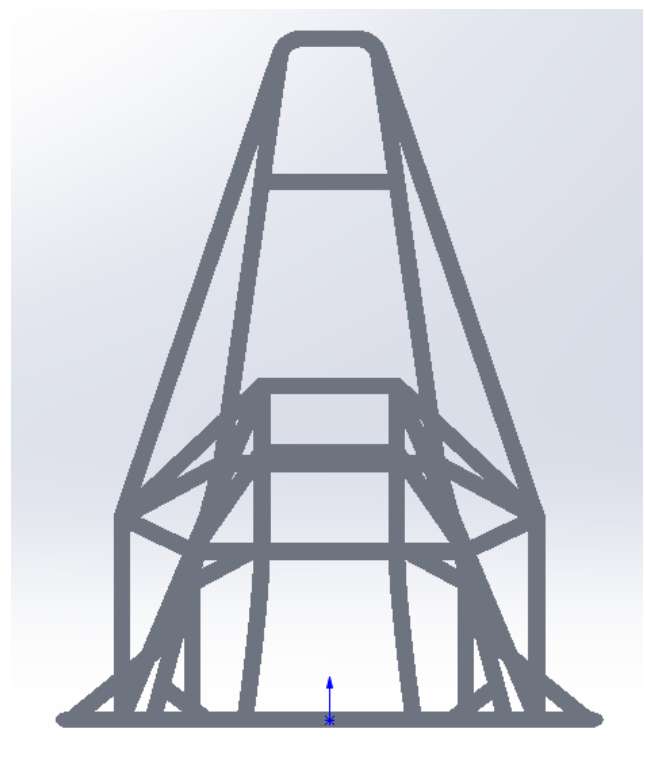


Figura 50. Vista frontal del nou xassís

Eixos de coordenades

S'ha mantingut el criteri d'eixos definit per el xassís del 2018. A la figura 52 es pot comprovar la direcció dels eixos.

Model

Tal i com s'ha explicat anteriorment, moltes de les parts i característiques presents en el model original de 2018 també estan presents en el nou model.

Aquest és el cas per el tren de rodes posteriors i els seus punts d'ancoratge amb el xassís. Com ja s'ha comentat en l'apartat 5.3 "Similituds entre els dos xassís", s'han mantingut igual que en l'original les distàncies dels punts d'ancoratge dels amortidors posteriors al terra i a l'arc de seguretat, i s'ha considerat que les articulacions emprades en les connexions amb el tren de rodes posterior serien les mateixes que en el xassís de 2018.

És per això que es poden aplicar les mateixes simplificacions i condicions en quant a aquests punts d'ancoratge que en el xassís original. Aquestes restriccions, ja explicades i raonades en l'apartat [xassís 2018], eren:

- Els ancoratges dels amortidors posteriors suporten càrregues en direcció vertical (eix Y), mentre que els ancoratges secundaris posteriors transmeten càrregues horitzontals (eix X).
- No es transmet parell al xassís en els punts d'ancoratge posteriors.
- Les rodes davanteres transmeten un parell al punt d'ancoratge davanter.

Com al xassís original, s'ha simplificat el model considerant que totes les masses externes que hi actuen es concentren en dos punts: el seient del pilot i la safata de components. El propi pes del xassís el té en compte el programa en activar la gravetat en les simulacions, així que les masses que s'hauran d'assimilar en aquests punts són: el pilot, els components (bateria, motor, variador...), la carrosseria, el sistema de direcció i el sistema de transmissió.

A continuació s'analitzaran les masses aproximades dels components del vehicle i s'assimilaran a un dels dos punts comentats anteriorment, ja sigui al seient del pilot o la safata dels components, i s'estudiarà com aplicar aquestes condicions al xassís en les simulacions.

Pes aplicat al seient del pilot: $75\text{kg} = [\text{pes del pilot} = 60\text{kg} + [\text{seient, sistema de direcció, carrosseria, altres components} = 15\text{kg}]]$

Pes aplicat a la safata elèctrica de components: $40\text{ kg} = \text{pes del motor} + \text{bateria} + \text{sistema elèctric} + \text{altres components}$

Pes del xassís: $9,86\text{ kg}$

Pes total aproximat: $124,86\text{ kg}$

A la figura següent s'observa la distribució de masses en el xassís que s'ha utilitzat en les simulacions, els punts d'ancoratge amb les rodes davanteres i el tren de rodes posterior i altra nomenclatura general de la estructura que s'utilitzarà en el treball. En les simulacions es repartirà la massa assignada a cada punt entre les barres marcades a la figura 52.

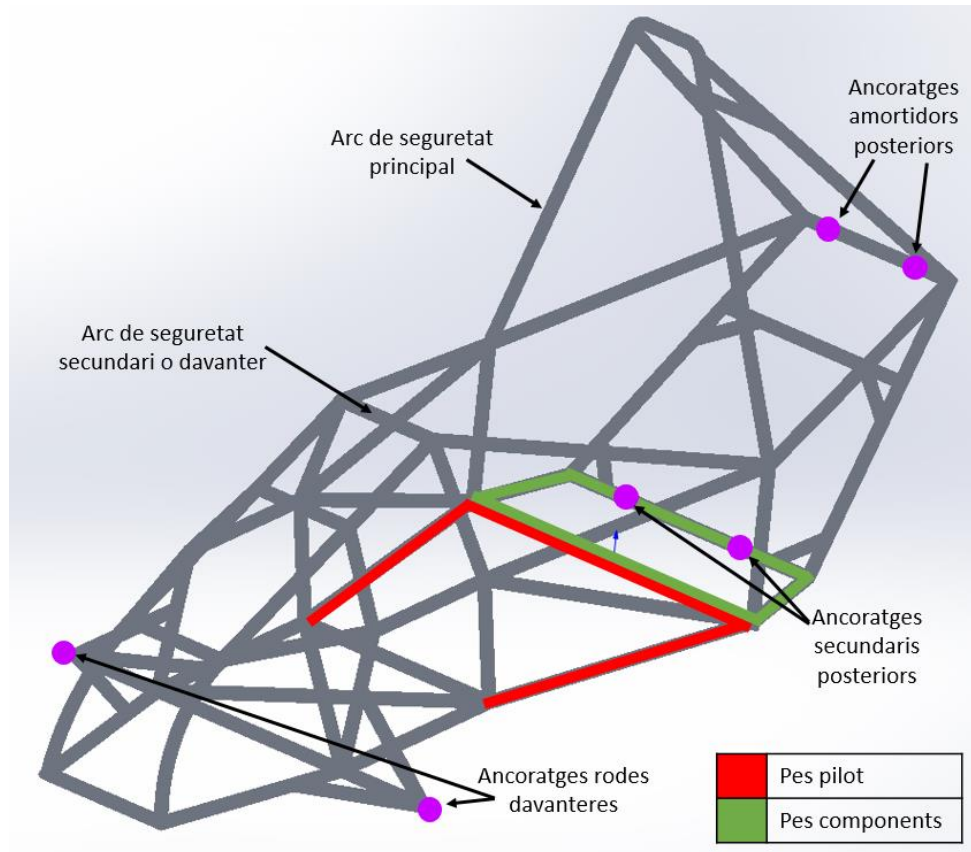


Figura 52. Distribució de masses al xassís optimitzat i els punts d'ancoratge

7.1 Proves de verificació

A continuació es comprovarà que el xassís compleix la normativa vigent de l'Electrocat en tots els aspectes no relacionats amb els estats de càrrega del vehicle. Aquests requeriments ja s'han tingut en compte a l'hora de dissenyar el nou xassís, així que aquest apartat serveix senzillament per verificar-ho i deixar-ne constància.

Dimensions del vehicle:

Els requeriments impostats per la competició són els següents:

- 1) El vehicle ha de ser prou gran com per ubicar un pilot de mínim 1,7m. d'alçada.
- 2) La longitud mesurada dels extrems del xassís o la carrosseria ha de estar entre 1200 i 2400 mm.
- 3) L'amplada mesurada dels extrems del xassís o la carrosseria (incloent les rodes) ha de estar entre 800 i 1600 mm.
- 4) La alçada mesurada des del terra fins al punt més alt del xassís o la carrosseria ha de estar entre 600 i 1700 mm.
- 5) La separació mínima entre el xassís i el terra ha de ser de 50mm.

1- Com s'ha comentat anteriorment, el vehicle està dissenyat per ser pilotat per una persona de 1,70m d'alçada. Per comprovar que es pot ubicar còmodament dintre del cotxe, s'ha utilitzat les mesures aproximades del cos d'una persona d'aquesta mida per realitzar un esbós orientatiu de la posició del pilot dins del monoplaça. En la figura 53 es pot comprovar que el pilot cap perfectament dins del xassís.

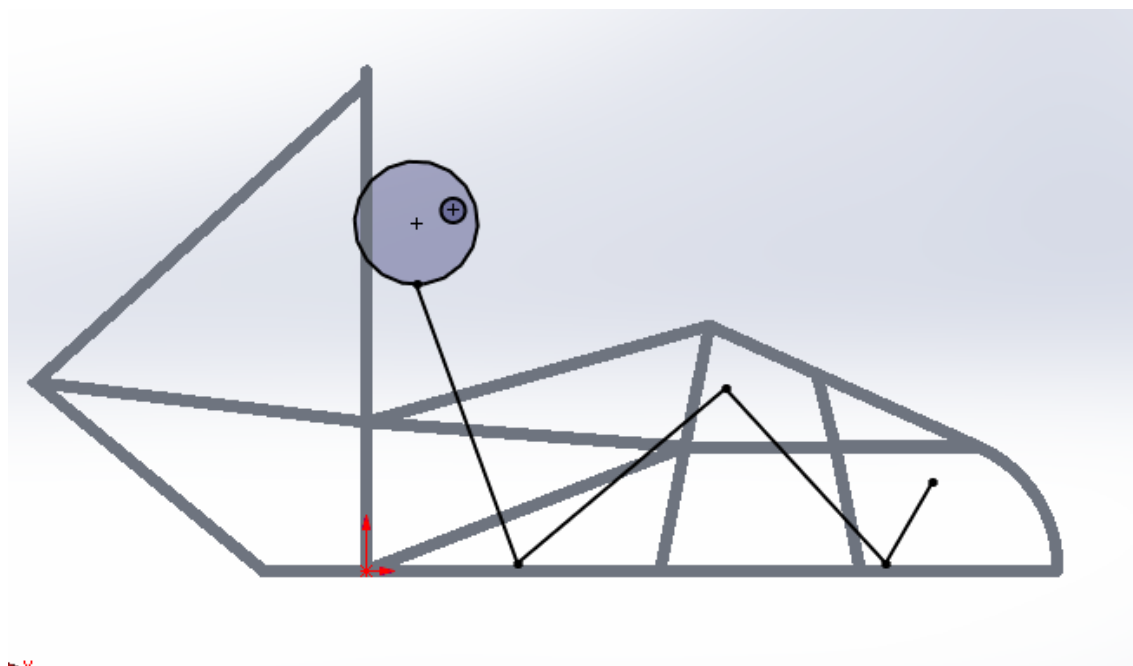


Figura 53. Croquis de la posició normal de conducció per un pilot d'1.70 m

- 2-** La llargada del nou xassís és de 2070 mm, compleix la normativa
- 3-** L'amplada del nou xassís en el seu punt més ample (que és entre els punts d'ancoratge de les rodes davanteres) és de 765mm. Si es té en compte que falten les rodes davanteres, és segur que l'amplada final està dins els marcs de la competició.
- 4-** L'alçada màxima del xassís és de 1070mm. Tenint en compte que el radi de les rodes serà d'aproximadament 200mm, no es sobrepassaran els límits de la competició.
- 5-** Aquesta mesura dependrà de les rodes utilitzades per l'equip en el nou model.

Arc de seguretat

Els requeriments imposats per la competició són els següents:

1. L'arc de seguretat abastarà l'amplada total de les espatlles dels pilots autoritzats, ha d'estar inclòs en el xassís i estendre's 50mm sobre l'extrem superior del casc del pilot en la posició normal de conducció.

1- Segons la normativa de l'Electrocat, és obligatori que la part més alta de l'arc de seguretat estigui separada 5 cm sobre l'extrem superior del casc del pilot en la posició normal de conducció. En aquest disseny això no és un problema ja que aquesta distància, calculada a partir de l'esbós de la figura anterior, fa 19,3 cm.

Un altre punt que la normativa exigeix complir és que les espatlles del pilot quedin en tot moment dins de l'arc de seguretat. A partir del croquis del pilot ja creat s'ubica aproximadament l'altura de les espatlles del pilot, que estarà a uns 5-7.5 cm de la part inferior del cap. Pel que fa a l'amplada, s'ha considerat que un pilot de 1.70 d'alçada tindrà una espatlla de màxim 45cm d'amplada.

Amb aquests valors, dibuixant sobre el croquis la ubicació de l'espatlla del pilot, es comprova com les espatlles queden dins de l'arc de seguretat.

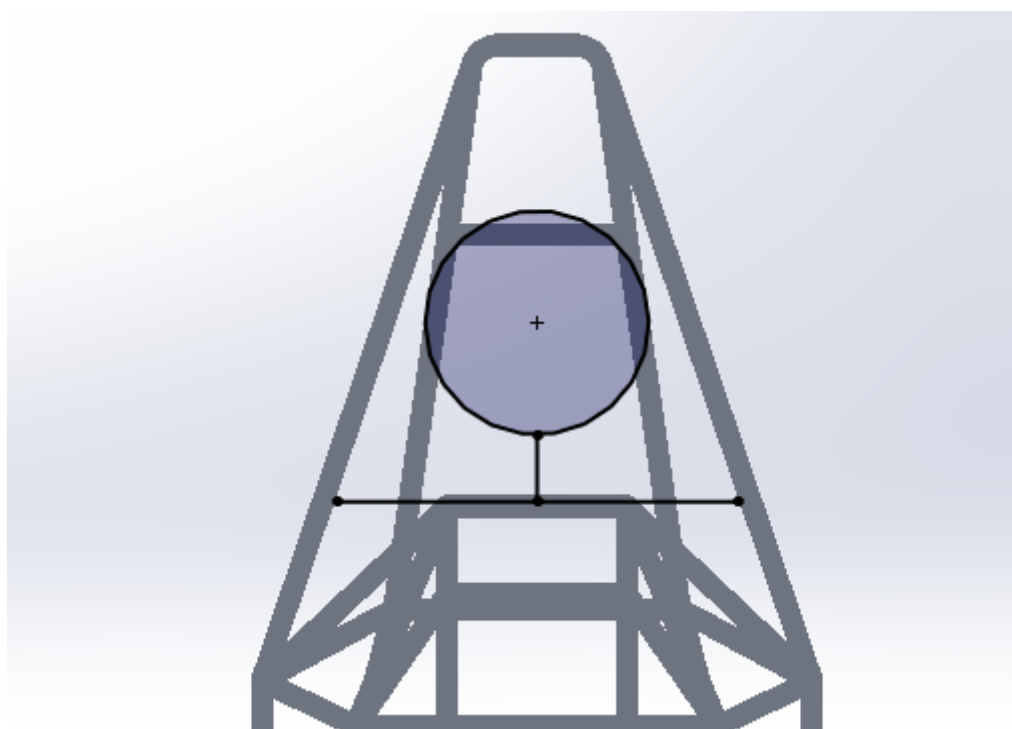


Figura 54. Croquis de les espatlles del pilot

Així que, en referència a les normatives sobre l'arc de seguretat que imposa la competició, aquest xassís les compleix.

Visibilitat

Els requeriments imposats a la competició són els següents:

1. El pilot ha de tenir accés a un arc de visibilitat de 90° a cada costat de l'eix longitudinal del vehicle sense l'ajuda de cap dispositiu òptic o electrònic com miralls, prismàtics, o periscopis. El moviment del cap del pilot està permès per completar l'angle de visió.
- 1- Com es pot veure en la figura 53, el pilot té completa visibilitat del seu entorn a 90° a cada costat de l'eix longitudinal del vehicle. Per tant, es compleixen els requeriments de visibilitat.

8. Simulacions xassís 2019

Un cop fet el disseny preliminar del nou xassís, cal tornar a realitzar les simulacions que s'han fet anteriorment amb el xassís del 2018 per estudiar el comportament del nou disseny en diferents situacions. En base als resultats obtinguts es decidirà si la optimització ha resultat satisfactòria o no i si el xassís optimitzat compleix definitivament amb les condicions necessàries per competir en el Electrocat.

Realitzar les mateixes simulacions que s'han fet amb el xassís original també permetrà fer una comparació entre el xassís antic i el nou i determinar l'impacte de la optimització en diferents situacions.

Al tractar-se de les mateixes simulacions que les estudiades anteriorment, i haver-se explicat les analogies entre el nou xassís i l'original a l'apartat 7 "Xassís 2019", no és necessari tornar a repetir totes les explicacions referents a aquests estudis que s'han fet per el xassís original.

Per tant, per a les simulacions del xassís 2019 es poden consultar totes les explicacions de simulacions, condicions de contorn i càrregues aplicades a les simulacions del xassís del 2018. Si alguna d'aquestes condicions canvia en una nova simulació perquè depenia de la geometria del xassís, s'especificarà en el estudi pertinent com ha canviat.

A continuació es presenten els resultats dels estudis de les simulacions realitzades en el xassís 2019.

8.1 Torsió

Ja s'han explicat exhaustivament els canvis introduïts per millorar la rigidesa torsional del vehicle en el procés d'optimització, doncs aquest és el paràmetre que s'ha determinat crític i s'ha utilitzar per dissenyar el nou xassís. Els nous resultats de la prova a torsió, que ja s'han comentat a l'apartat d'optimització, són els següents:

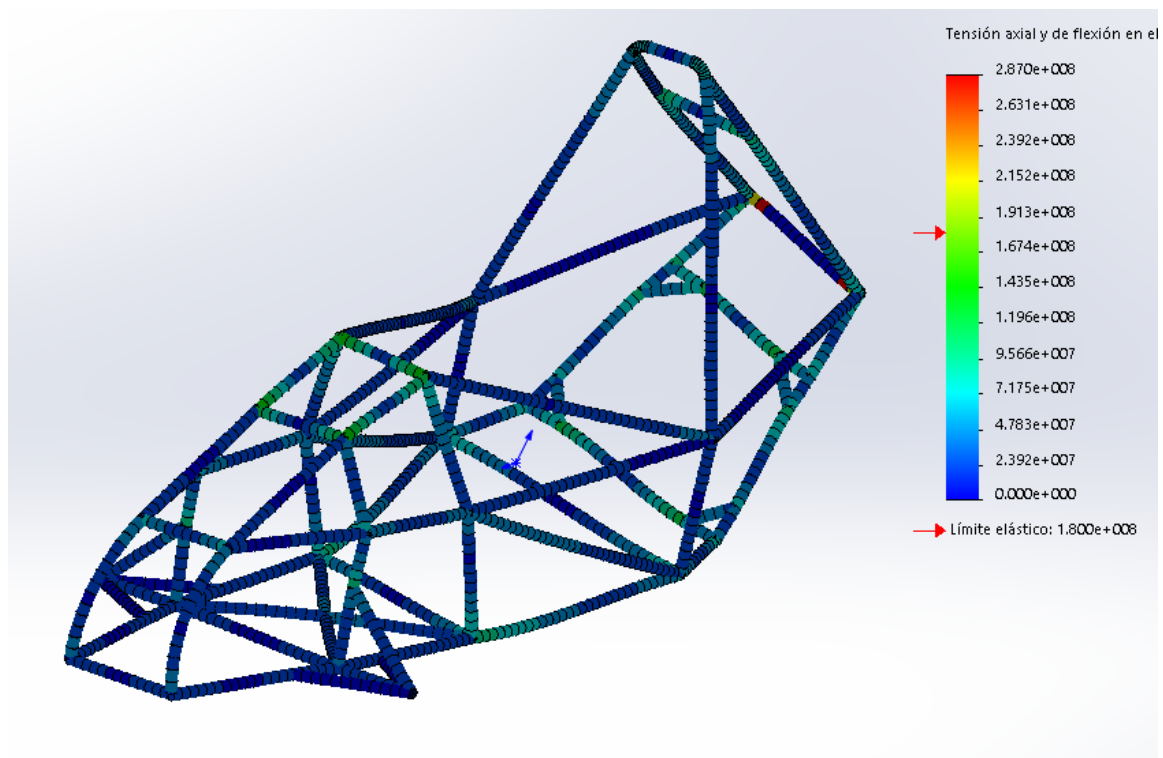


Figura 56. Distribució de tensions en l'assaig de torsió al xassís optimitzat

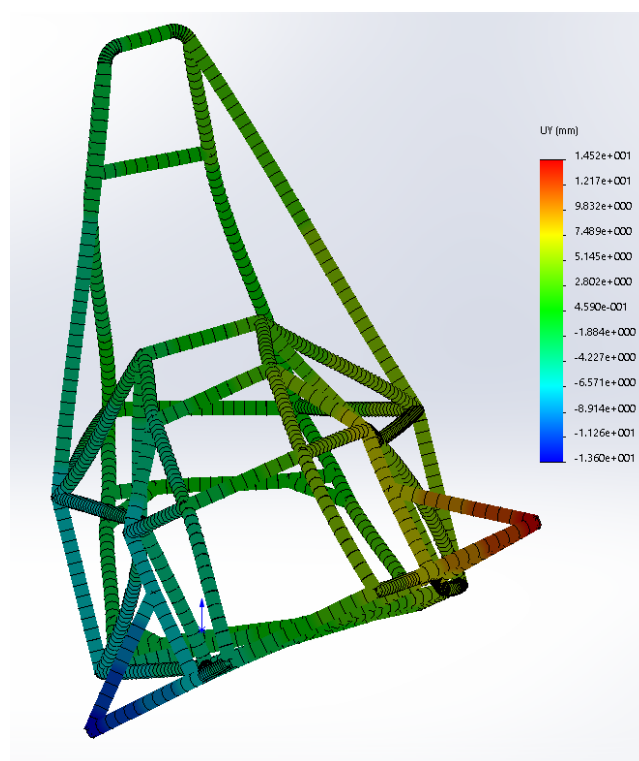


Figura 55. Desplaçaments en l'eix Y en l'assaig de torsió al xassís optimitzat

	Xassís 2018	Xassís V13	Variació
Pes	8,17 kg	9,86 kg	+20,69%
Ktors	153,16 N·m/º	475,03 N·m/º	+210,15%

Com es pot veure, la millora del comportament del xassís al estar sotmès a esforços de torsió és evident. Tal i com s'ha explicat en el procés d'optimització i l'estudi a torsió del anterior xassís, es pot esperar una millora important en el comportament dinàmic del vehicle en pista al haver incrementat la rigidesa torsional.

8.2 Flexió

Com s'ha explicat anteriorment, la rigidesa a flexió no ha estat un dels paràmetres determinats com crítics que s'han utilitzat per dimensionar el nou xassís.

Al construir tot el nou xassís amb barres de 25x2 en comptes de 30x2, seria normal pensar que els resultats d'aquesta prova seran pitjors que els obtinguts en l'original. No obstant això, com s'han afegit barres de reforç a la base, que com s'ha comprovat al estudi de flexió del xassís original és on es concentren més tensions en aquest estudi, és possible que els resultats a tensió es mantinguin o fins i tot, que millorin els obtinguts amb el model anterior.

Resultats

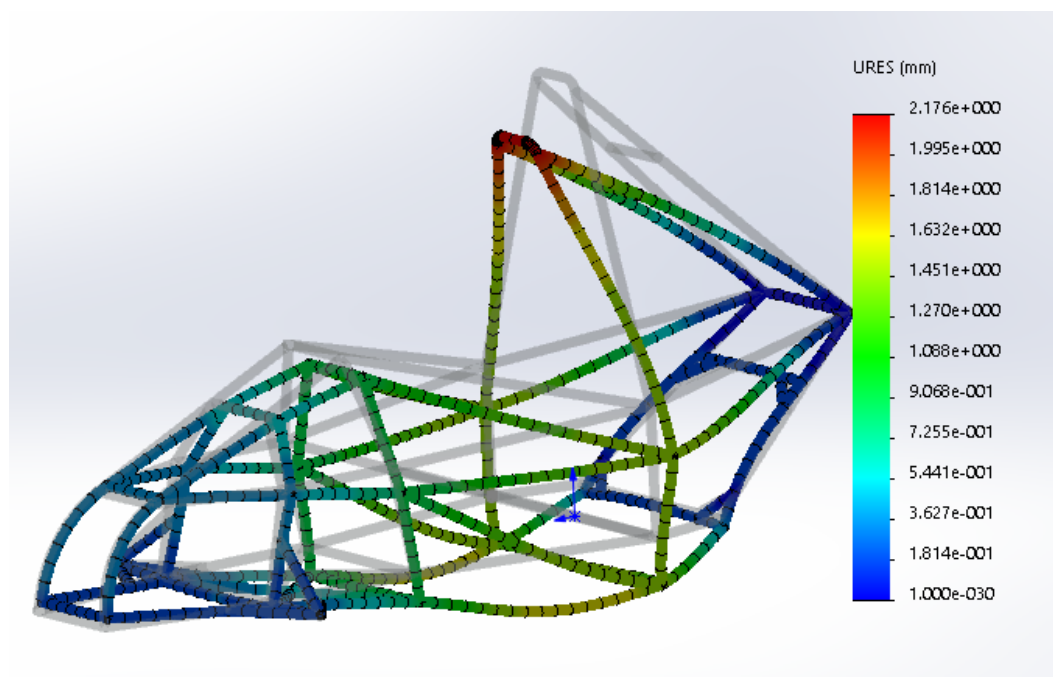


Figura 57. Desplaçaments totals en l'assaig a flexió al xassís optimitzat

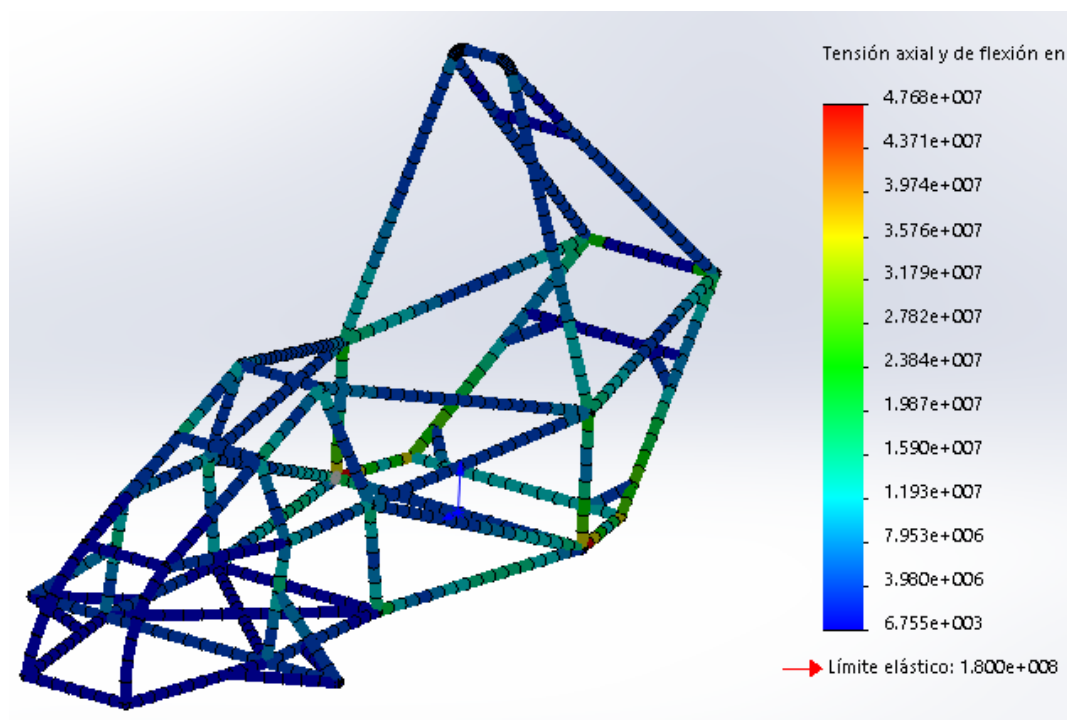


Figura 58. Distribució de tensions en l'assaig a flexió al xassís optimitzat

	Xassís 2018	Xassís 2019	Variació
Desplaçament màxim	3.523 mm	2.17 mm	-38.4%
Tensió màxima	40.60 MPa	47.68 MPa	17.43 %

Com es pot comprovar a les figures anteriors, els resultats de l'anàlisi a flexió del nou xassís són pitjors que en l'original.

Ja s'ha comentat que aquests resultats són els esperats, ja que no s'ha dimensionat amb l'objectiu de millorar la rigidesa a flexió, sinó la rigidesa a torsió.

Les tensions màximes obtingudes al nou xassís segueixen essent molt llunyanes als valors del límit elàstic. Això es veu reflectit en l'elevat coeficient de seguretat de 3,5 que s'ha obtingut en els nous estudis, que tot i que és menor que el coeficient de 4,43 que presentava l'original en aquesta simulació, segueix deixant molt marge abans de tenir una fallida del material.

Els nous desplaçaments màxims han disminuït lleugerament respecte l'original. El seu valor, de 2,17mm, segueix sent poc significatiu. Aquests resultats donen encara més validesa al procediment seguit a la optimització, doncs confirmen que la rigidesa a flexió no és un

paràmetre crític en el procés d'optimització seguit, i que els resultats d'aquesta prova segueixen sent satisfactoris.

8.3 Impacte frontal

En l'etapa d'optimització s'han afegit més barres de reforç a la part davantera del xassís, així que s'espera que els resultats d'aquesta prova millorin considerablement. Tot i que les barres siguin d'un diàmetre inferior, el fet d'introduir més ramificacions a les juntes i haver triangulat les barres ajuda a distribuir les tensions generades en l'impacte de manera més uniforme al llarg de tota la estructura.

Es realitza l'anàlisi per comprovar que aquestes suposicions són certes i per comparar com varia el valor dels desplaçaments per efecte del xoc frontal. Cal recordar l'objectiu d'aquest estudi és augmentar la seguretat del pilot, amb la qual cosa només es comprovaran els valors dels desplaçaments de les barres que rodegen la cabina per tal que cap barra impacti amb el pilot.

Hi ha un canvi, respecte el model del 2018, en el valor i en els punts d'aplicació de les forces.

La força d'impacte augmenta lleugerament ja que el pes del cotxe es major, ara la força a aplicar és de 10407.77 N.

Com el frontal del monoplaça actual no és un pla recte, sinó que està arrodonit, la zona que més força rebrà en cas d'impacte és la barra inferior, però pot ser que la força també es reparteixi entre les dues barres corbades que surten de la primera. És per això que s'ha considerat la següent distribució de forces:

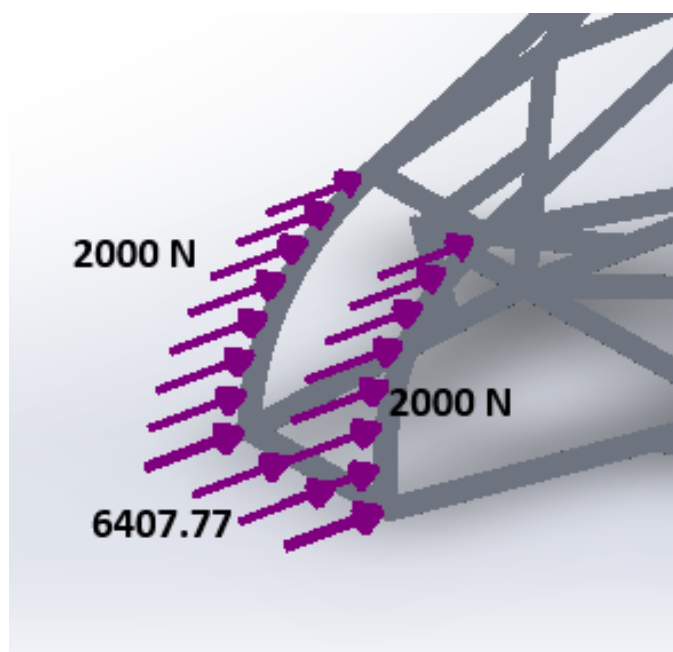


Figura 59. Distribució de les forces d'impacte al llarg del frontal del xassís

Resultats

Com ja s'ha comentat anteriorment, s'espera que les tensions superin el límit elàstic en cas d'impacte frontal, i l'estudi es centrarà només en els desplaçaments del xassís.

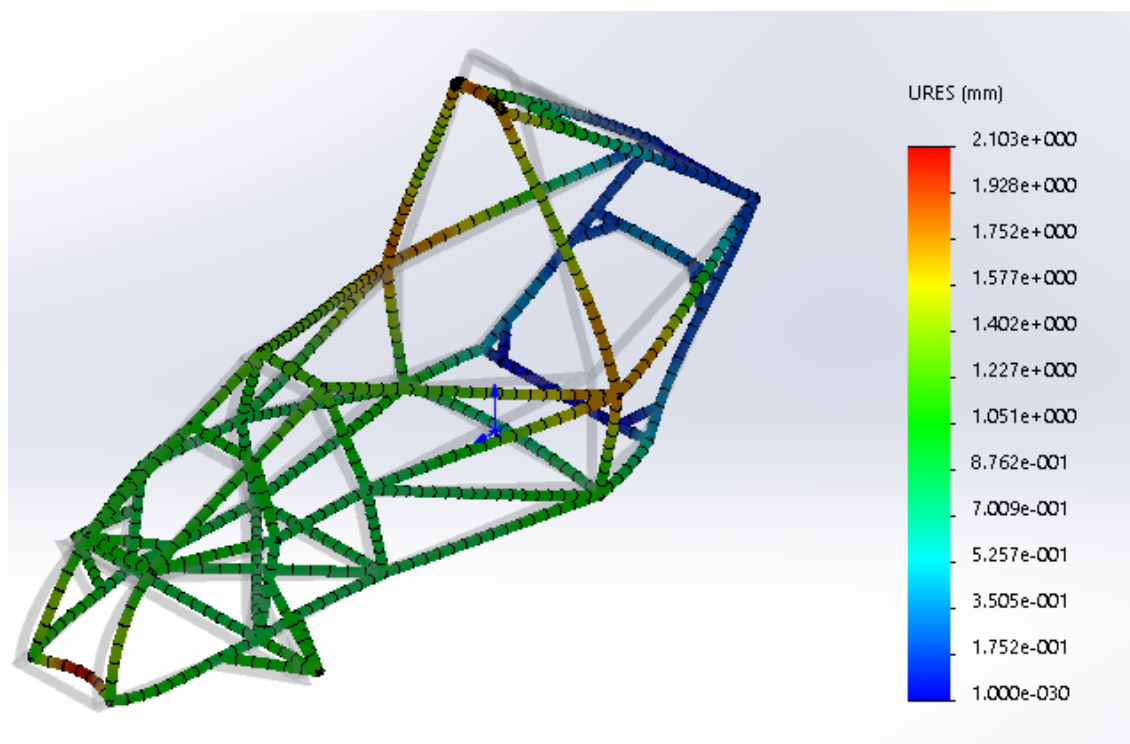


Figura 60. Desplaçaments totals en l'assaig d'impacte frontal al xassís optimitzat

Com es pot observar, els resultats d'aquest anàlisi milloren els del xassís del 2018 disminuint en un 42.6 % les deformacions de l'antic xassís.

	Xassís 2018	Xassís 2019	Variació
Desplaçament màxim	3.662 mm	2.103 mm	-42.57%

A més, s'ha aconseguit que el punt de màxim desplaçament s'allunyi el màxim possible de les barres que envolten al pilot. Ara la deformació màxima es troba a la barra frontal horitzontal del xassís, la deformació de la qual no posa en greu perill al pilot. Tota la resta de la estructura es deforma notablement menys que al xassís original.

8.4 Acceleració

Aquest estudi no s'ha tingut en compte directament a l'hora d'optimitzar el xassís, però és important comprovar que en situacions de funcionament en pista del xassís el comportament d'aquest és l'adequat i que no existeixen punts crítics que puguin provocar fallides del material.

Totes les condicions de contorn per l'anàlisi són iguals que pel xassís anterior, però com ha canviat el pes del xassís, s'han de tornar a definir algunes forces:

Component	Pes	Força gravitacional
Xassís	9.86 kg	96.72 N
Pilot	75 kg	735.75 N
Motor, variador, bateria...	40 kg	392.4 N

Punt d'aplicació	Acceleració	Força tracció
Ancoratge secundari posterior	1.25g	765.55 N per roda

Resultats

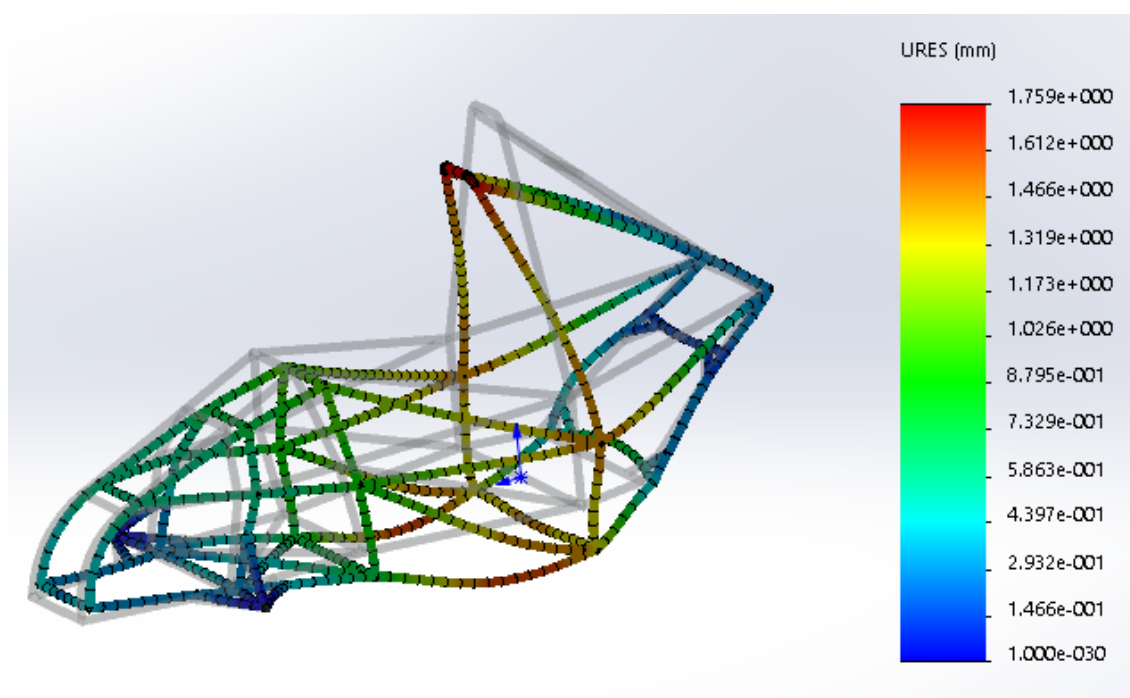


Figura 61. Desplaçaments totals en l'assaig d'acceleració al xassís optimitzat

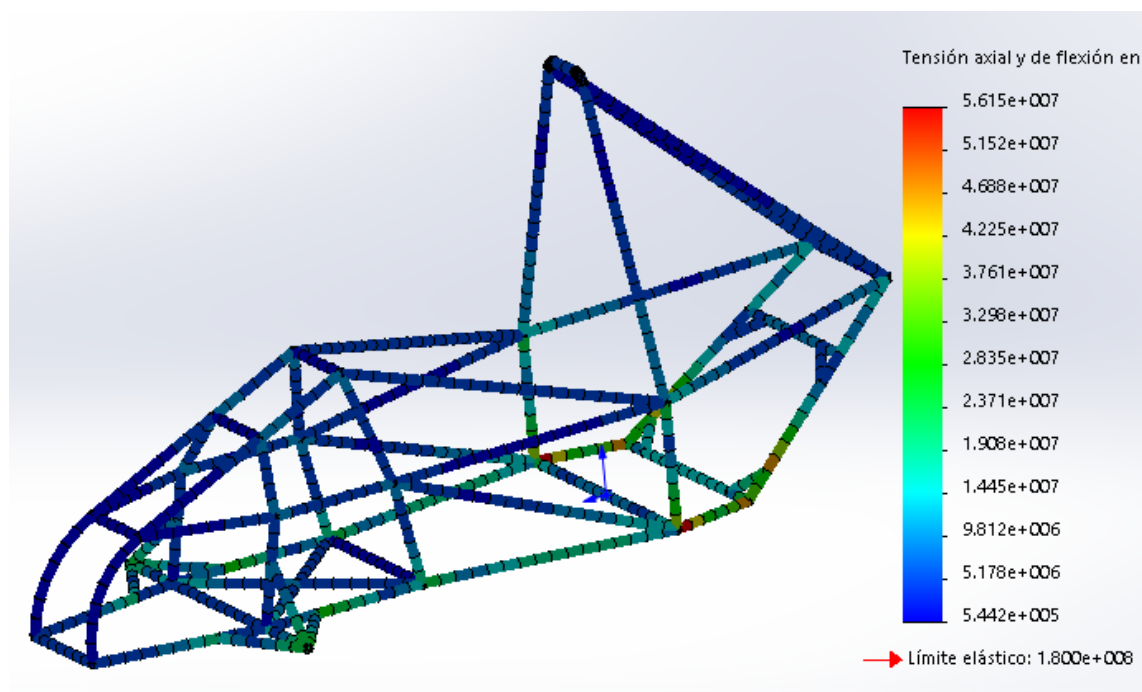


Figura 62. Distribució de tensions en l'assaig d'acceleració al xassís optimitzat

	Xassís 2018	Xassís 2019	Variació
Desplaçament màxim	3.523 mm	1.759 mm	-50.07%
Tensió màxima	44.99 MPa	56.15 MPa	24.8 %

Les tensions màximes obtingudes no son preocupants, es té un valor de 56.15 MPa , tenint un factor de seguretat bastant elevat.

A la figura 60 s'observa com s'ha deformat la peça, obtenint un valor de desplaçament màxim de 1.759 mm. Representa una millora significativa respecte el xassís del 2018 ja que disminueix un 50%. Encara que no s'hagi optimitzat pensant en aquest anàlisi, com ha passat en alguna simulació anterior, el fet d'afegir una estructura amb més barres fa que augmenti la resistència i rigidesa global del xassís.

8.5 Frenada

Igual que en l'estudi d'acceleració, no s'ha optimitzat tenint en compte els resultats d'aquest anàlisi. Cal comprovar doncs que les tensions i deformacions del nou xassís en cas de frenada són segures. Com s'ha reforçat tota l'estructura el més segur és que els resultats millorin, per això es tornarà a realitzar l'estudi amb el nou xassís optimitzat.

Tal i com passa amb la simulació d'acceleració, les condicions de contorn són les mateixes imposades en els estudis del xassís 2018. Però com el xassís ha augmentat de massa, les forces gravitacionals i inercials d'aquest hauran augmentat també, i per tant canvien les càrregues aplicades. S'han de tornar a calcular aquests valors:

Component	Pes	Força gravitacional
Xassís	9.86 kg	96.72 N
Pilot	75 kg	735.75 N
Motor, variador, bateria...	40 kg	392.4 N

Component	Pes	Força acceleració
Xassís	9.86 kg	118.98 N
Pilot	75 kg	904.97 N
Motor, variador, bateria...	40 kg	482.65 N

Resultats

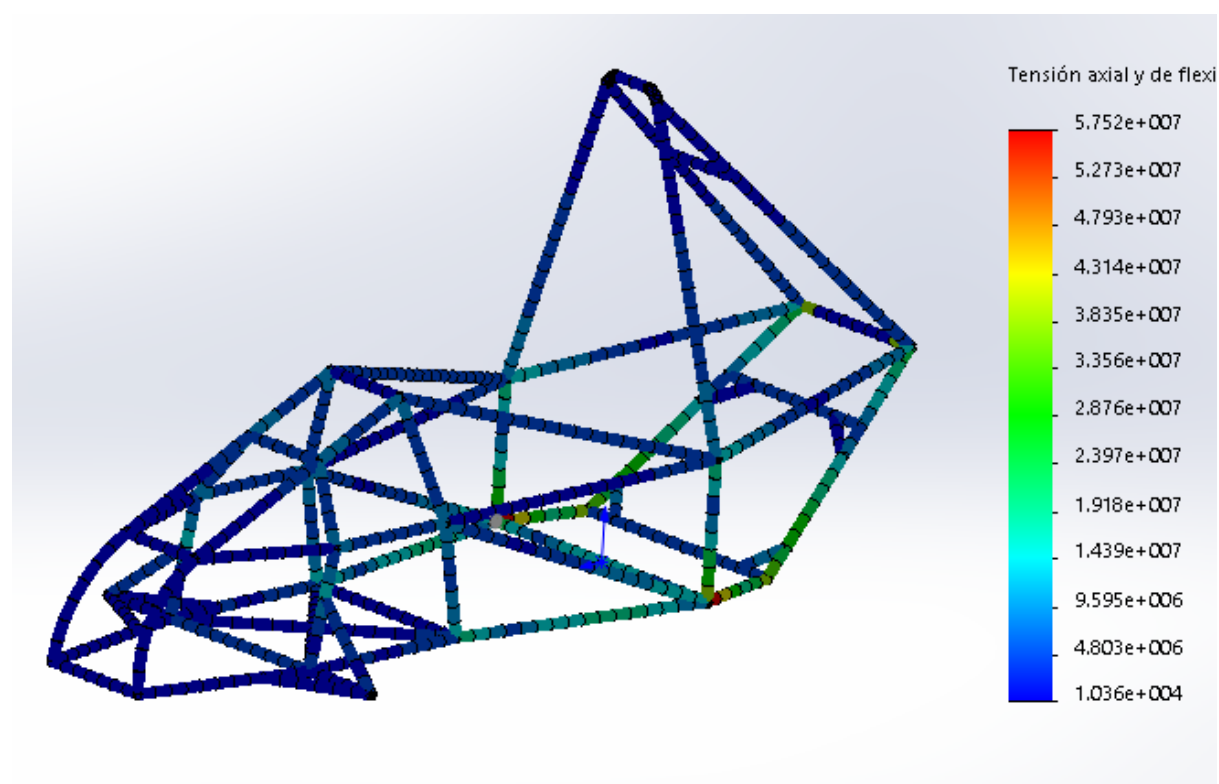


Figura 63. Distribució de tensions a l'assaig de frenada al xassís optimitzat

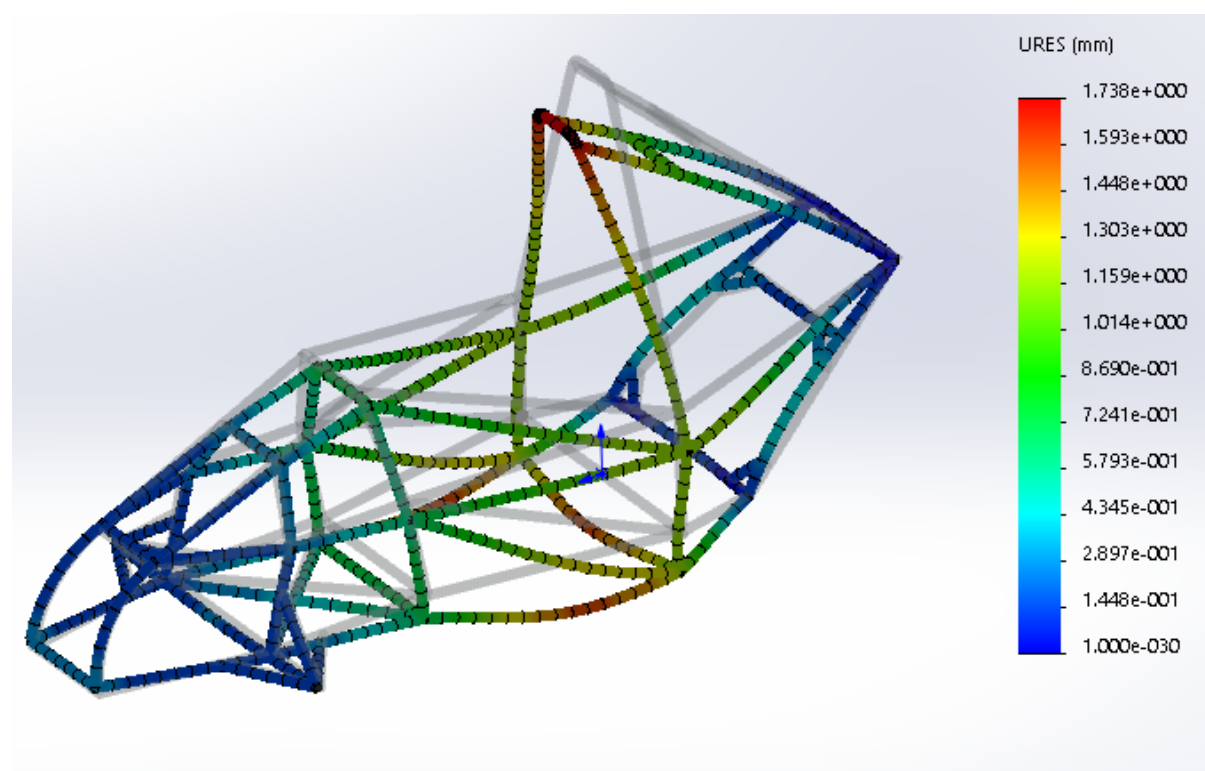


Figura 64. Desplaçaments totals a l'assaig de frenada al xassís optimitzat

	Xassís 2018	Xassís 2019	Variació
Desplaçament màxim	3.577 mm	1.355 mm	-62.12 %
Tensió màxima	45.27 MPa	57.72 MPa	+27.5 %

Els desplaçaments obtinguts són un 62.12 % menors que en el del 2018. Es una millora significativament bona tot i que aquest anàlisi no era dels més crítics.

Pel que fa a les tensions màximes, augmenta en un 27.5% però el valor de 57.72 MPa segueix sent un valor bastant baix. Si es calcula el factor de seguretat en el nou xassís s'obté el valor 3.15. Encara que ha baixat 1 punt respecte el de l'any passat, és un valor realment alt amb el qual es pot assegurar que cap part del xassís patirà després de realitzar la frenada.

Corba

Com tots els estudis en pista que no s'han considerat crítics a l'optimitzar el xassís, cal comprovar que els resultats obtinguts en aquestes situacions són els desitjables i no posen en risc la integritat del vehicle.

S'espera obtenir millores significatives en els resultats de l'estudi en corba, ja que la rigidesa torsional s'ha incrementat considerablement en el nou model, i aquest paràmetre determina en gran mesura el comportament del vehicle en el pas per corba.

Com passava en els estudis anteriors, les condicions de contorn aplicades són les mateixes que en l'estudi del xassís original, però les càrregues s'han de recalcular al haver augmentat la massa del nou xassís. Les forces gravitacionals i centrífugues que afecten en aquesta simulació passaran a ser els següents:

Component	Pes	Força gravitacional i centrífuga
Xassís	9.86 kg	96.72 N
Pilot	75 kg	735.75 N
Motor, variador, bateria...	40 kg	392.4 N

Cal tenir en compte que les forces s'aplicaran sobre el xassís seguint exactament el mateix criteri que s'ha seguit en les simulacions del xassís original.

Fixades les condicions de contorn i les càrregues del no estudi, es procedeix a analitzar els gràfics resultants.

Resultats

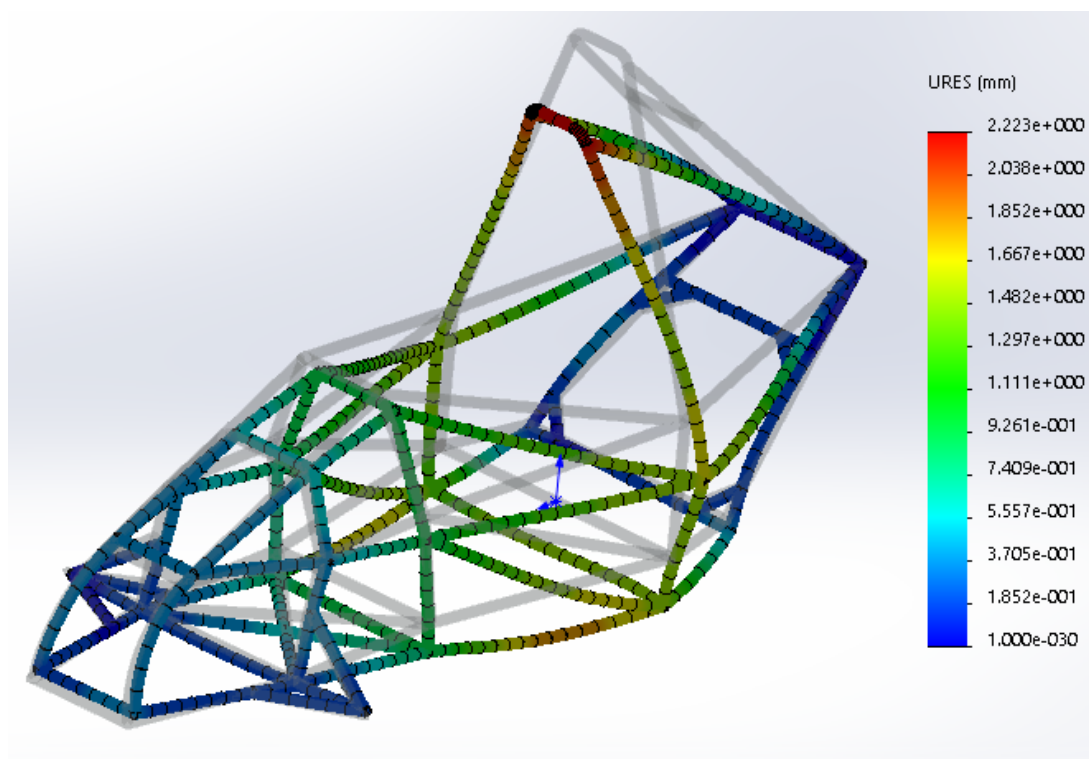


Figura 65. Desplaçaments totals a l'assaig de pas per corba al xassís optimitzat

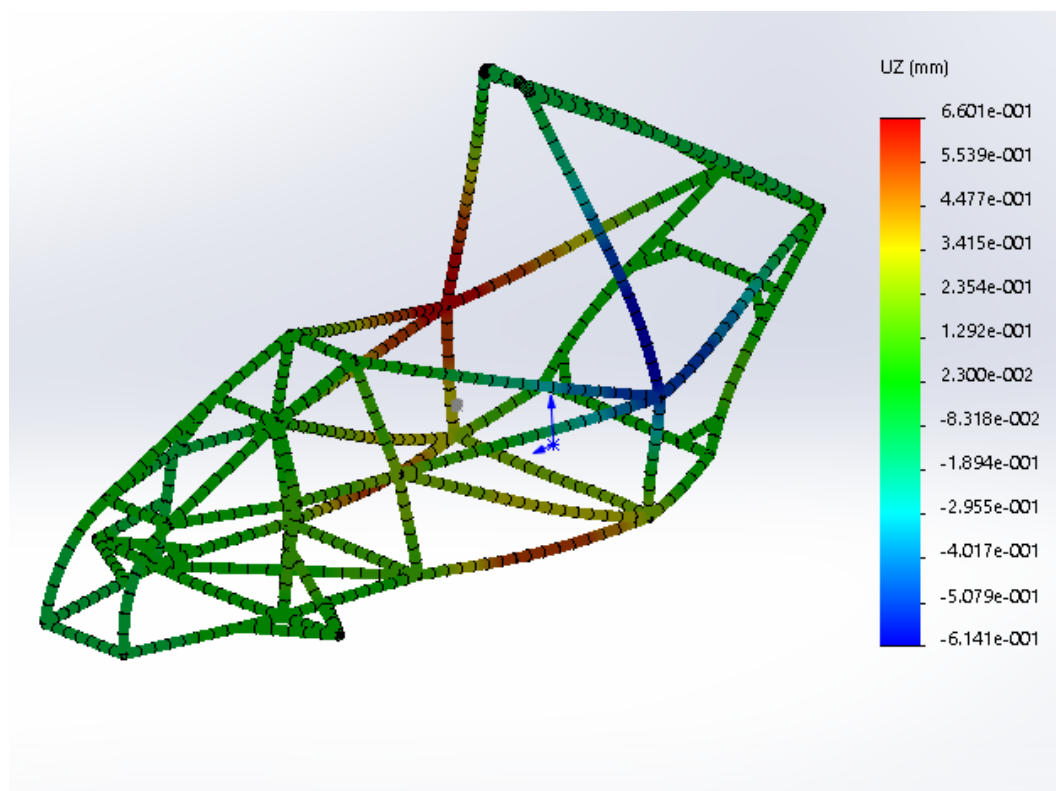


Figura 66. Desplaçaments en l'eix Z a l'assaig de pas per corba al xassís optimitzat

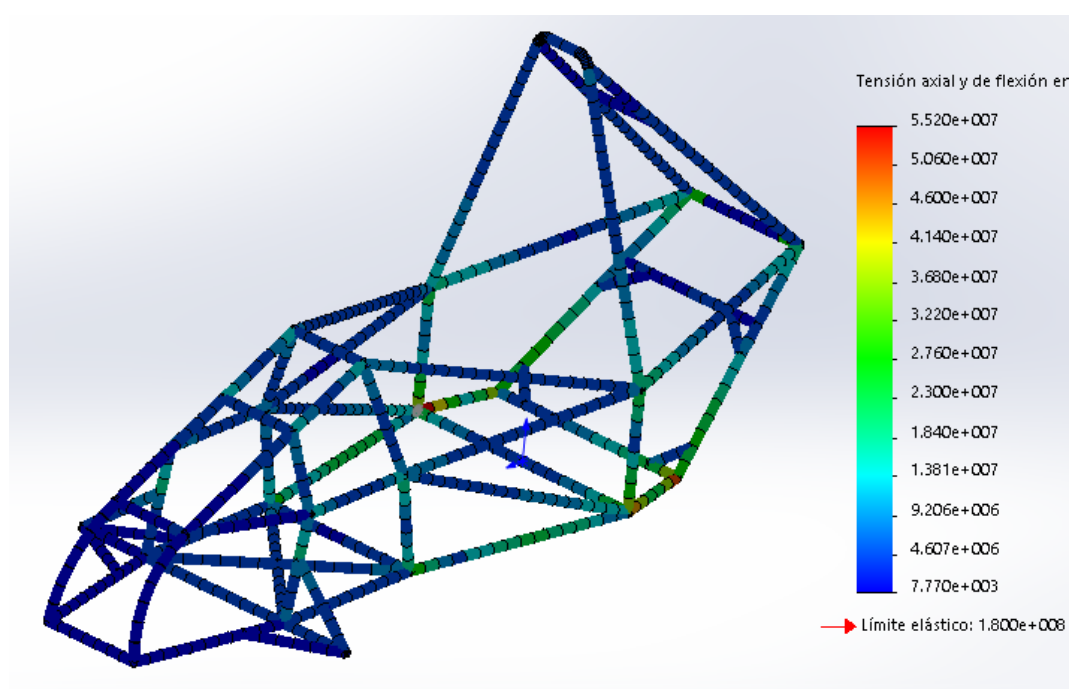


Figura 67. Distribució de tensions a l'assaig de pas per corba al xassís optimitzat

	Xassís 2018	Xassís 2019	Variació
Desplaçament màxim	3.538 mm	2.223 mm	-37.17 %
Desplaçament en z màxim	0.55 mm	0.66 mm	20 %
Tensió màxima	43.58 MPa	55.20 MPa	26.66 %

Com passa en els estudis de frenada i acceleració, els nous valors de desplaçament totals son més petits que els obtinguts amb el xassís anterior. S'obté un desplaçament màxim de 2.223 mm, però aquest valor no es del tot rellevant en l'estudi de la corba, ja que, gran part d'aquesta deformació pot ser deguda al pes propi de cada component del vehicle. Es per això que s'estudia les deformacions al llarg de l'eix Z (direcció que conté les forces centrípetes) i resulta un desplaçament màxim de 0.66 mm. Ha augmentat un 20% el valor obtingut en el xassís del 2018, però segueix sent un valor menyspreable que no es pot notar a simple vista.

Pel que fa a les tensions, la màxima és de 55.2 MPa i s'obté en el punt d'unió de l'arc de seguretat i la part inferior del xassís, i correspon a un punt on s'aplica el pes de la safata de components. Es un 26.66% més gran que el de l'any passat, però manté un factor de seguretat alt, d'uns 3.2.

En vista dels resultats obtinguts, es pot validar el model de xassís creat per realitzar una corba de les característiques comentades.

8.6 Bolcada

En aquesta simulació es repeteix la prova imposada en el reglament de l'Electrocat per comprovar la resistència de l'arc de seguretat en cas de bolcada en diferents direccions.

S'espera obtenir uns resultats similars als obtinguts a la prova del xassís original, doncs tot i que les barres del xassís són més fines que les de l'original s'ha mirat de compensar aquest fet afegint barres de reforç en l'arc de seguretat.

Com en l'estudi de bolcada del xassís de 2018, es considera que la prova del reglament es realitzarà amb el vehicle parat, del dret i sense masses aplicades.

Les condicions de contorn seran les mateixes que en l'altre estudi, i les càrregues s'aplicaran també a la barra superior de l'arc de seguretat principal. Recordem que en aquesta prova la direcció i valor de les càrregues les determina el propi reglament (700N en els 3 eixos).

Resultats:

Força vertical (eix Y negatiu)

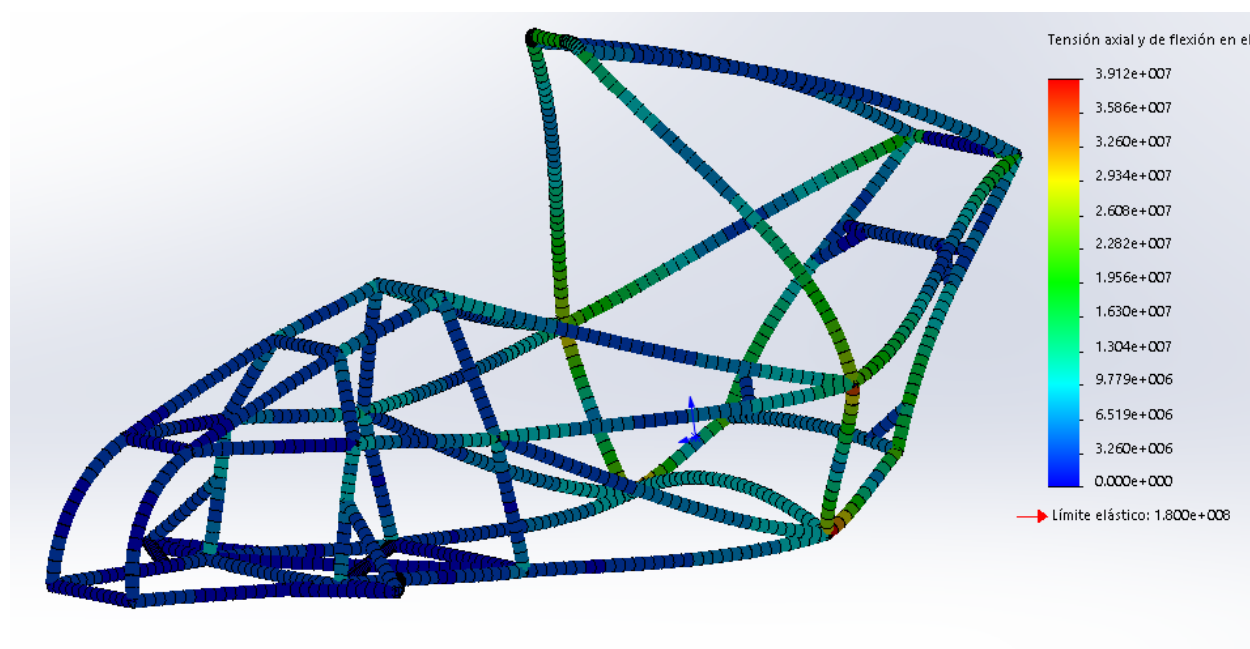


Figura 68. Distribució de tensions a l'assaig de bolcada al xassís optimitzat – Força en direcció Y negativa

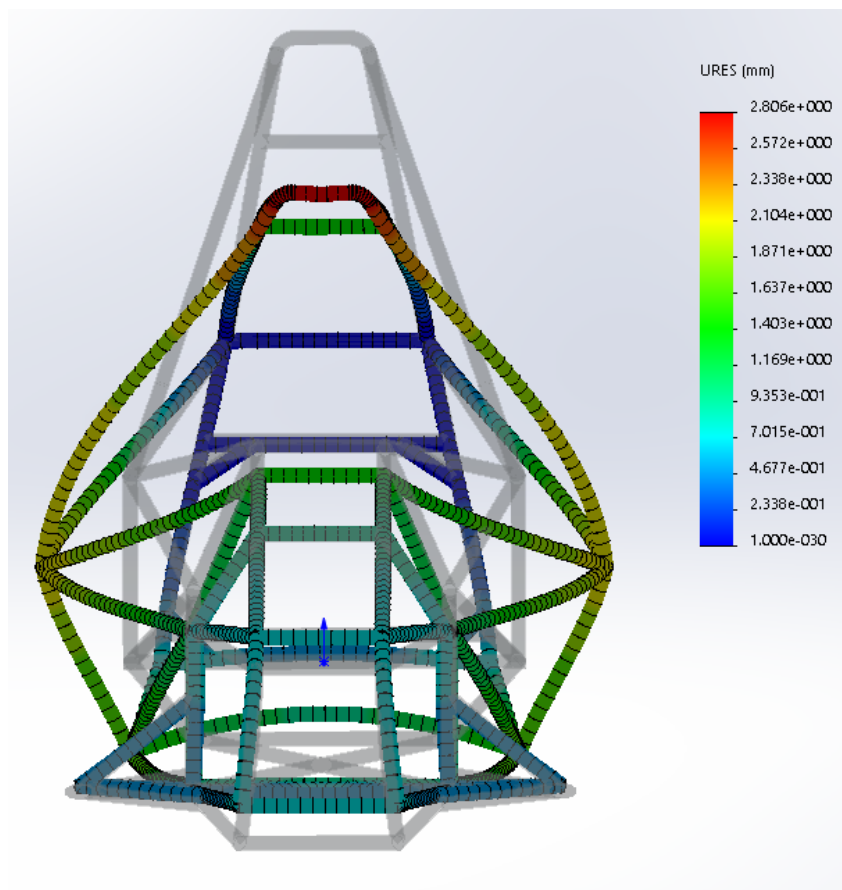


Figura 69. Desplaçaments totals a l'assaig de bolcada al xassís optimitzat – Força en direcció Y negativa

FORÇA Y	Xassís 2018	Xassís 2019	Variació
Desplaçament màxim	4,141 mm	2,806 mm	-32.24 %
Tensió màxima	37,37 MPa	39,12 MPa	+4,68 %

En aquest cas és correcte comparar tensions màximes assolides en ambdós xassís perquè apareixen allunyades de les singularitats del model i per tant no estan distorsionades.

Com es pot apreciar, els punts on es concentren les tensions màximes en ambdós models són els mateixos (base de l'arc de seguretat) i aquestes són de valors molt similars. El nou xassís, però té uns desplaçaments lleugerament menors en aquesta prova, però la diferència és poc significativa (1,3mm).

Cal remarcar que les tensions segueixen allunyades del límit elàstic, amb un coeficient de seguretat de 4,6 per aquest estudi.

Força perpendicular a l'arc (eix X negatiu)

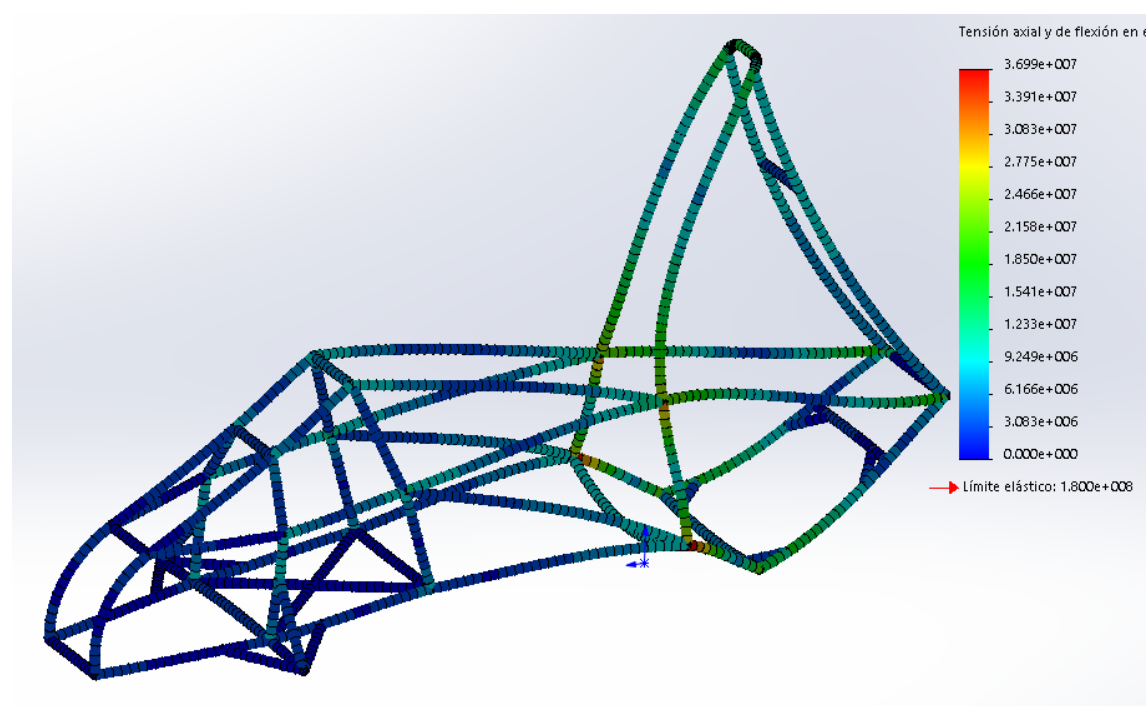


Figura 70. Distribució de tensions a l'assaig de bolcada al xassís optimitzat – Força en direcció X negatiu

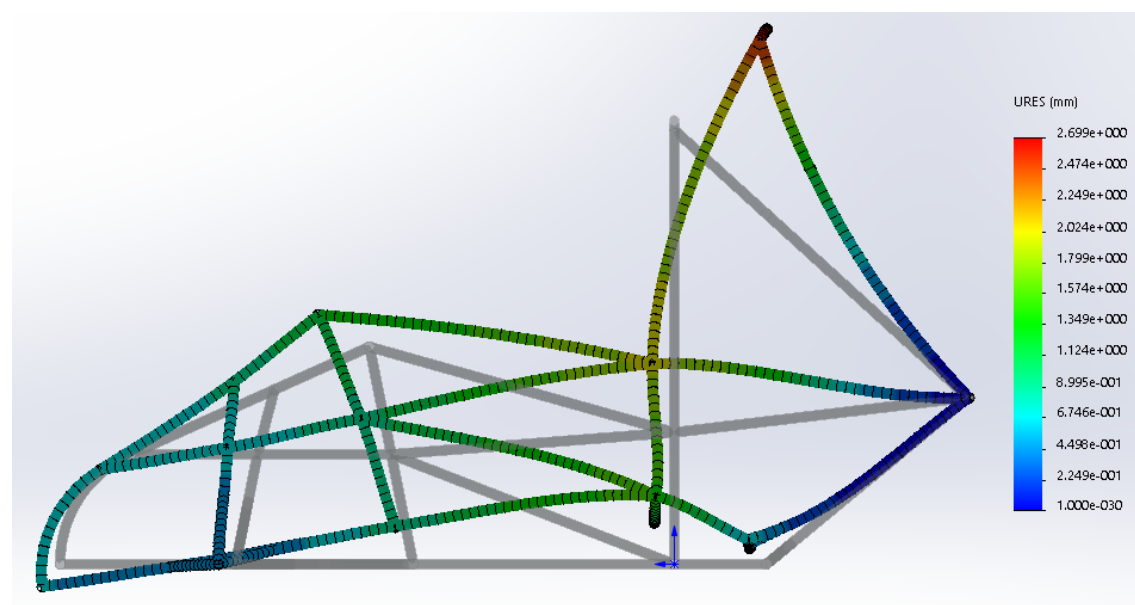


Figura 71. Desplaçaments totals a l'assaig de bolcada al xassís optimitzat – Força en direcció X negatiu

FORÇA X	Xassís 2018	Xassís 2019	Variació
Desplaçament màxim	3,102 mm	2,699 mm	-12,99 %
Tensió màxima	28,9 MPa	36,99 MPa	+27,99 %

En aquest cas també és correcte comparar tensions màximes assolides en ambdós xassís perquè apareixen allunyades de les singularitats del model i per tant no estan distorsionades.

Com es pot apreciar, els punts on es concentren les tensions màximes en ambdós tornen a ser els mateixos (base de l'arc de seguretat), però en aquest cas hi ha hagut un increment significatiu de les tensions màximes assolides en el nou model. El nou xassís, però té uns desplaçaments lleugerament menors en aquesta prova, però la diferència és poc significativa.

Tot i que les tensions màximes han empitjorat amb el nou model, el coeficient de seguretat per aquest estudi segueix sent molt elevat (4,87), i per tant en cap cas es considerarà que aquest sigui un cas crític.

Força horitzontal (eix Z negatiu) :

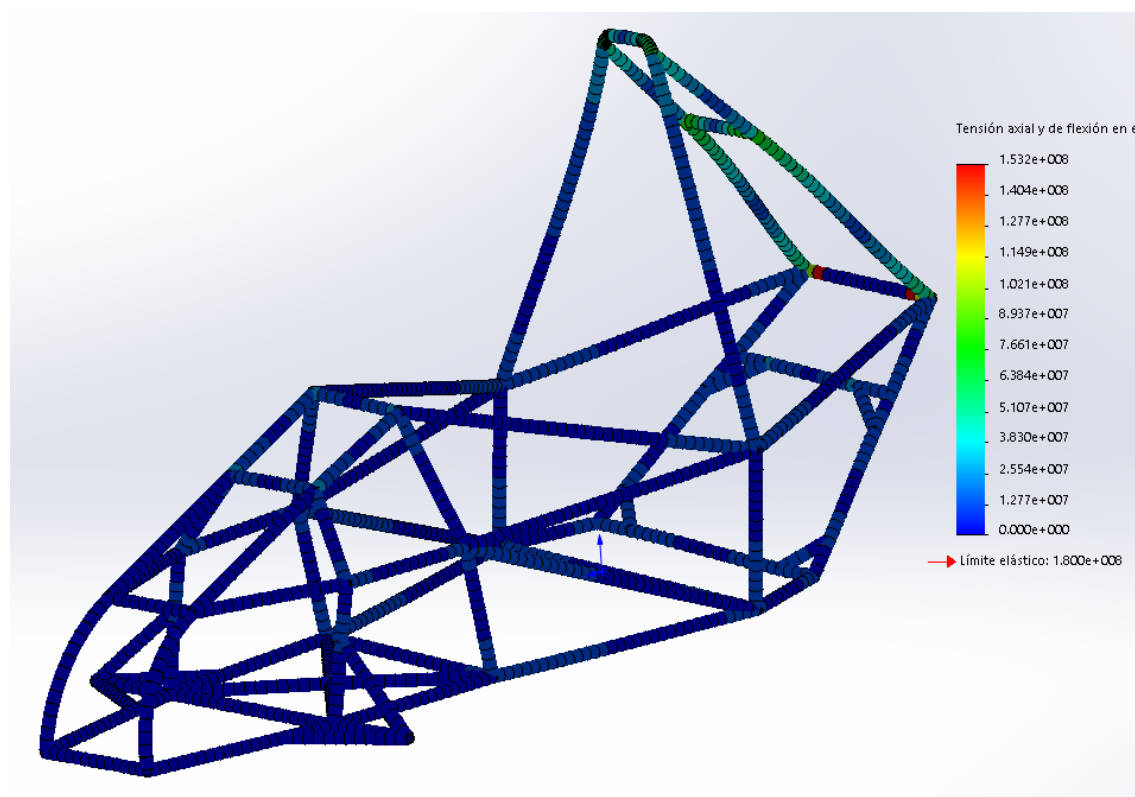


Figura 72. Distribució de tensions a l'assaig de bolcada al xassís optimitzat – Força en direcció Z negatiu

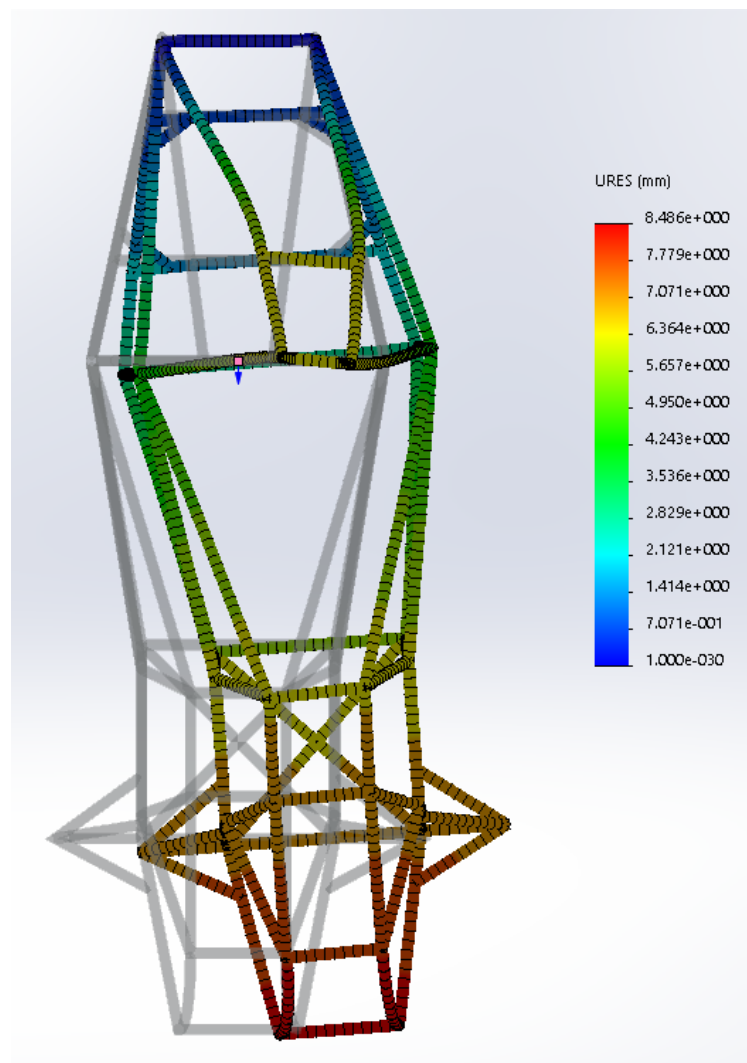


Figura 73. Desplaçaments totals a l'assaig de bolcada al xassís optimitzat – Força en direcció Z negatiu

FORÇA Z	Xassís 2018	Xassís 2019	Variació
Desplaçament màxim	22,42 mm	8,486 mm	-62,15 %

En aquest cas no es compararan les tensions màximes d'ambdós xassís, doncs aquestes es concentren a la singularitat creada al fixar els punts d'ancoratge dels amortidors posteriors, i podrien estar distorsionades.

Tot i així, es pot apreciar que al llarg de tota la estructura del nou model les tensions i les deformacions són molt menors que les existents per aquesta mateixa prova al xassís original. Per exemple, en l'arc principal de seguretat s'assolien tensions de fins a 120MPa

(coeficient de seguretat de només 1,5), mentre que en el nou disseny les tensions de l'arc no arriben als 90 MPa (coeficient de seguretat de 2).

Com s'ha comentat en l'anterior anàlisi de bolcada del xassís original, la situació de força aplicada en l'eix Z és amb diferència la més crítica. Tot i que els resultats obtinguts en les altres dues proves de bolcada (força en l'eix X i força en l'eix Y) siguin lleugerament més crítics que en el xassís original, el nou model disminueix les tensions i deformacions del cas de bolcada més crític, i per tant es considera que la optimització del xassís ha millorat el cas de bolcada.

9. Conclusions

Un cop acabat el projecte és important sintetitzar el treball realitzat i proposar noves línies de treball per oferir als lectors la possibilitat de continuar expandint els estudis d'aquesta memòria.

Això és especialment important quan es parla de l'optimització del disseny d'un vehicle de competició, ja que aquests dissenys es canvien de manera anual, i l'objectiu de cada any és millorar els punts febles del de l'any passat.

El primer objectiu d'aquest treball ha estat comprendre el comportament de la estructura del xassís original en diversos tipus de situacions. Això s'ha estudiat mitjançant simulacions per computador que han ajudat a identificar els aspectes del xassís on més millores es podien implementar.

Un cop conegut el comportament mecànic del model del 2018, s'han implementat canvis en el seu disseny basant-se en una sèrie de criteris establerts a partir dels resultats dels primers estudis. Obtingut un possible model definitiu, s'ha estudiat el comportament mecànic d'aquest de la mateixa manera que 'ha fet amb el xassís original, i s'han comparat els resultats obtinguts en els dos models.

En vista a la evident millora en els resultats de les simulacions del nou model de xassís, i comprovant que compleix els requeriments normatius per participar en l'Electrocat, s'ha donat per vàlid aquest disseny. Com ja s'ha comentat anteriorment, la decisió de si implementar els canvis proposats o no recaurà en l'equip CREVE.

A continuació es proposen una sèrie de línies de treball en les que no s'ha arribat a aprofundir en aquest treball, ja sigui per manca de recursos, coneixements o temps:

- Anàlisi de l'impacte de la carrosseria en el rendiment del vehicle:
Es proposa realitzar un estudi de l'aerodinàmica del vehicle utilitzant un software de simulació de fluids per determinar si aquesta té un impacte significatiu en el rendiment en pista del vehicle.
- Disseny del tren posterior de rodes:
Es proposa fer un nou disseny del tren posterior de rodes que tingui una forma més tradicional que l'actual. Això implicaria també modificar la part posterior del xassís per adaptar-la al nou tren posterior.
- Implementació d'amortidors a les rodes davanteres:
Es proposa dissenyar un nou sistema d'ancoratge de les rodes davanteres que implementi amortidors.
- Estudi dels centres de gravetat del vehicle:
Es proposa fer un estudi a fons de la distribució de masses del vehicle, sobre l'efecte

que té aquest sobre el rendiment en pista i proposar noves possibles distribucions que el millorin.

Finalment, cal puntualitzar que aquest treball ha servit per posar en pràctica molts dels coneixements apresos al llarg del grau, especialment en les matèries de mecànica, expressió gràfica i de resistència de materials.

També ha servit per aprofundir en un tema poc estudiat en el grau, l'automobilisme, i ha atorgat una gran quantitat de coneixements sobre el disseny de vehicles.

10.Agraïments

Agrair al tutor Emilio Hernández per la seva guia i consell al llarg del treball.

Al equip CREVE i a tots els integrants per facilitar la informació del xassís original i pel consell i ajuda rebuda. Els coneixements automobilístics compartits per l'equip han estat de gran ajuda per la realització d'aquest treball.

A les nostres famílies i amics pel suport incondicional al llarg de tot el procés de creació del treball, i al llarg de tot el grau. Sense vosaltres no hauria estat possible tirar-ho endavant.

11. Bibliografia

Referències:

- [1] ELECTROCAT / Reglament tècnic (edició V)
[http://vehiculeelectric.rieradecaldes.com/uploads/1/6/7/8/16789666/reglament_tecnic_electrocat_v_2018.pdf]

Complementària:

- [2] DASSAULT SYSTEMS / Pàgina d'ajuda per el software SolidWorks.
http://help.solidworks.com/2017/english/SolidWorks/sldworks/c_introduction_toplevel_topic.htm
- [3] MASSACHUSSETS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, DAVID ROYLANCE /
Mechanical properties of materials.
<http://web.mit.edu/course/3/3.225/book.pdf>
- [4] UNIVERSIDAD DE LOS ANDES / Simulación y análisis de una prueba de choque de un automóvil tipo deportivo[...]
<http://www.redalyc.org/pdf/5075/507550790011.pdf>
- [5] YOUWHEEL / Car body torsional rigidity / Conté valors aproximats de rigideses torsionals de models actuals de vehicles
<http://youwheel.com/home/2016/06/20/car-body-torsional-rigidity-a-comprehensive-list/>
- [6] INSTITUTO MEXICANO DEL SEGURO SOCIAL / Datos antropométricos.
<https://pt.slideshare.net/juangonzalezleija/cfakepathdatos-antropometricos-3925719>